

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки
Кафедра акустики та акустoeлектроніки

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ В.С. Дідковський

(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 20__ р.

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності (спеціалізації) 6.05080301 «Акустичні засоби та системи»
(код та назва спеціальності)

на тему: Акустичне оформлення транспортного каналу купюр в системах банкоматів

Виконав студент 4 курсу, групи ДГ-51

_____ Бугай Ярослав Віталійович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник _____ проф. каф. ААЕ, д. т. н., проф. Коржик О. В. _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

(підпис)

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет електроніки

Кафедра акустики та акустoeлектроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) 6.050803 «Акустичні засоби та системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.С. Дідковський

(підпис) (ініціали, прізвище)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект (роботу) студенту

_____ Бугаю Ярославу Віталійовичу

1 Тема проекту (роботи) : Акустичне оформлення транспортного каналу купюр в системах банкоматів

керівник проекту (роботи) проф. каф. ААЕ, д. т. н., проф. Коржик О. В. _____,

затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом роботи : 10.06.2019

3. Вихідні дані до роботи :детектування здвоєності грошових купюр за допомогою ультразвукового сенсора здвоєності на основі вимірювання звукоізоляції грошових купюр .

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити): Розробка та дослідження ультразвукового сенсора для контролю здвоєності банківських купюр. Дослідження недоліків існуючих банківських систем контролю здвоєності, а також закінчених індустриальних систем, що базуються на ультразвукових сенсорах та використовуються на виробництві і типографіях, та розробка власного рішення опираючись на інформацію отриману при дослідженні.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) : презентація.

6. Дата видачі завдання 20.01.2019

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Огляд існуючих систем. Аналіз наукової літератури	20.01.2019 - 19.02.2019	Виконано
2	Дослідження конструкції акустичного оформлення ультразвукового сенсора здвоєності.	19.02.19 - 10.03.19	Виконано
3	Розробка прийомного тракту ультразвукового сенсора здвоєності.	10.03.19 - 1.04.19	Виконано
4	Написання програмного забезпечення	1.04.19 - 15.04.19	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки та презентації.	15.04.2018 - 01.06.2018	Виконано

Студент

(підпис)

Бугай Я.В.

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Коржик О. В

(ініціали, прізвище)

Реферат

Робота містить 56 сторінок, 36 рисунки та 21 літературних джерел.

Метою роботи є розробка та практична реалізація макету ультразвукового сенсора здвоєності грошових купюр, на основі вимірювання звукоізоляції та хвилеводного поширення ультразвукових хвиль .

Проведено теоретичне моделювання, розрахунок акустичного та електричного тракту системи та лабораторне макетування . Запропоновано схемо-технічну реалізацію аналогової та цифрової обробки сигналів, розроблено конструкцію друкованої плати, та підібрані електронні компоненти схеми.

Ключові слова: система контролю здвоєності, хвилевод, ультразвуковий контроль, аналого-цифровий перетворювач, мікроконтролер,

ABSTRACT

The work consists of 56 pages, 36 pictures and 21 literature sources. The topic of the work is development and practical realisation of the experimental model of the double banknote detection sensor, which based on measuring of acoustic insulation and ultrasonic wave-guide propagation.

Theoretical modeling, designed of the acoustic and electrical path of the system and laboratory modeling was conducted, and else the hardware and digital design of the signal processing was presented. The design of the printed circuit board was developed, selected recommended electronic components of the circuit.

Key words: double banknote detection system, wave-guide, ultrasonic control, operational amplifier, microcontroller , analog to digital converter

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ1.ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ПОРУШЕННЯ ТРАНСФЕРУ ГРОШОВИХ КУПЮР.....	9
1.1.Огляд існуючих систем порушення трансферу грошових купюр.....	9
1.2.Індустріальні системи контролю здвоєності.....	11
1.3.Висновок.....	18
РОЗДІЛ2. ФІЗИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ КУПЮР.....	19
2.1.Формування акустичного поля у вимірювальній трубі.....	19
2.2.Вимірювання звукоізоляції в трубі.....	25
2.3.Висновок.....	26
РОЗДІЛ3. ТЕХНІЧНЕ КОНСТРУЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СЕНСОРА ЗДВОЄНОСТІ.....	27
3.1.Принцип вимірювання рівня сигналу.....	27
3.2.Функціональна, структурна та електрична схема пристрою	29
3.3.Акустичного оформлення сенсора.....	31
3.4.Розрахунок та вибір компонентів схеми пристрою.....	33
3.4.1. Попередній підсилювач.....	33
3.4.2. Розрахунок амплітудного детектора та інтегратора.....	37
3.4.3. Розробка цифрової частини схеми.....	38
3.4.4. Блок живлення.....	41
3.5.Розробка друкованої плати.....	41
3.5.1 Аналіз зовнішніх впливів, які можуть виникнути при експлуатації ДП.....	42
3.6.Лабораторне макетування.....	45
3.7.Висновок.....	49

ВИСНОВОК.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

АЧХ	–	Амплітудно-частотна характеристика
ФЧХ	–	Фазо-частотна характеристика
АЦП	–	аналого-цифровий перетворювач
ФНЧ	–	фільтр низької частоти
ФВЧ	–	фільтр високої частоти
ЕАП	–	електро-акустичний перетворювач
ОП	–	операційний підсилювач

Вступ

На цей час в системах банківського обігу коштів проводиться складна обробка сигналів щодо отримання інформації про купюру яка була введена в систему, знаходження їх положення, геометричних параметрів тощо. Важливою задачею є визначення кількості введених купюр на початковому етапі введення. В деяких випадках через людський фактор в систему може бути введено декілька купюр одночасно, які накладені одна на одну, або питома густина купюри не відповідає заданій, тобто справжній купюрі. Це потрібно для прийняття рішення щодо дозволу або заборони надходження її в подальший транспортний канал. В існуючих системах купюро приймачів вже розроблені такі системи, які можуть відрізняти кількість введених купюр, але за відповідних форматів купюр. Основною проблемою є виявлення здвоєності купюр які мають прозоре пластикове вікно. Детектування купюр з такими вікнами неможливе для існуючих систем.

Пошук сенсорів, які б одночасно мали низьку ціну і необхідний функціонал, не дав позитивних результатів. Саме цим і обумовлена актуальність дослідження, а саме в розробці універсального рішення для вирішення проблем виявлення нестандартних купюр та пластикових карт, на основі вимірювання звукоізоляції матеріалу за допомогою ультразвуку, яке дозволить виявляти дефект незалежно від кольору, розмірів, формату купюри, забезпечуватиме достатній рівень виявлення та матиме низьку собівартість.

Метою роботи є розробка системи контролю здвоєності, а також дослідження закінчених індустріальних систем, що базуються на ультразвукових сенсорах та використовуються на виробництві і типографіях, Вирішенню підлягають три задачі:

- розробка акустичної частини сенсора, а саме універсальної конструкції для імплементації в існуючі системи банкоматів ;
- розробка схемо-техніки сенсора;
- створення лабораторного макету, та дослідження роботи сенсора.

Сенсор, що розробляється в роботі складається з хвилеводу, двох ультразвукових п'єзоелектричних перетворювачів, блоків аналогової та цифрової обробки сигналу. Обробка в аналоговому блоці передбачає використання операційних підсилювачів з якісним співвідношенням ціна/якість. Цифровий блок передбачає використання мікроконтролера з АЦП достатньої розрядності та швидкодії. Отже, окрім розробки акустичної частини сенсора важлива також розробка схемо-технічного рішення прийомного тракту, розробка конструкції друкованої плати та дослідження роботи сенсора за допомогою практичної реалізації макету.

РОЗДІЛ I

ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ПОРУШЕННЯ ТРАНСФЕРУ ГРОШОВИХ КУПЮР ТА ІНДУСТРІАЛЬНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ЗДВОЄНОСТІ

1.1 Огляд існуючих систем порушення трансферу грошових купюр

В системах банківського обігу коштів , а саме грошових купюр застосовують сенсори різного типу, які дозволяють отримати вичерпну інформацію щодо стану купюри , розмірів , кольору тощо. Не менш важливим є отримання інформації про товщину купюри, а також про випадкове накладання двох купюр. В системах купюро-приймачів вже існують сенсори які дозволяють це зробити за допомогою різноманітних методів . Найпоширенішими є оптичні та механічні методи детектування. Конфігурація купюр не залежить від систем виявлення підробки , дані системи мають бути налаштовані під існуючі купюри .

Один з існуючих методів детектування – механічно-електричний[14]. Метод базується на основі вимірювання зусилля яке створює купюра при проходженні між транспортними роликами.

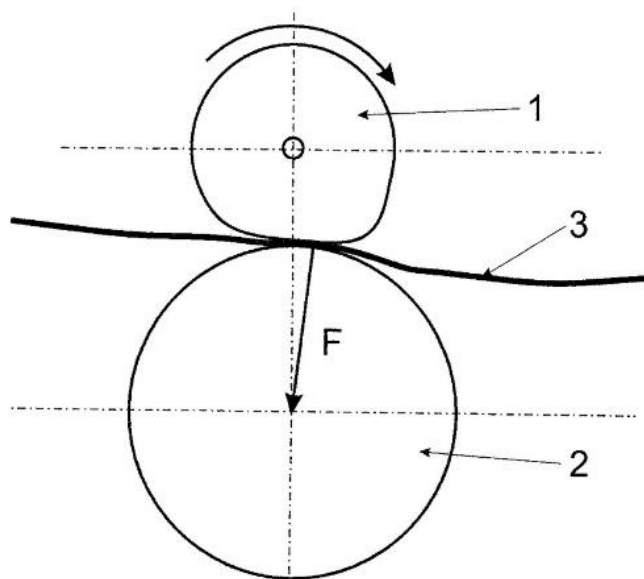


Рис.1.1.1 Принцип детектування здвоєності

При проходженні через зафіксовані ролики (Рис 1.1.1), купюра створює тиск на один з роликів, ось якого механічно діє на важіль резистора змінного опору, змінюючи струм, який протікає через резистор. В залежності від кількості купюр, тиск на ролик змінюється.

Недоліками даного методу є складність налаштування, та низька повторюваність результату через складний механізм закріплення осі ролика, що приводить до хибних відхилень резистору змінного опору. Низька надійність та захищеність від кліматичних, механічних впливів. Велика кількість типів купюр, які відрізняються по товщині та інших геометричних параметрах не дозволяють використовувати механічні сенсори, так як потрібно конфігурувати виробництво таких сенсорів під кожний окремий тип купюри.

Оптичні сенсори [13] використовують частіше. Принцип роботи таких сенсорів зображено на Рис.1.1.2.

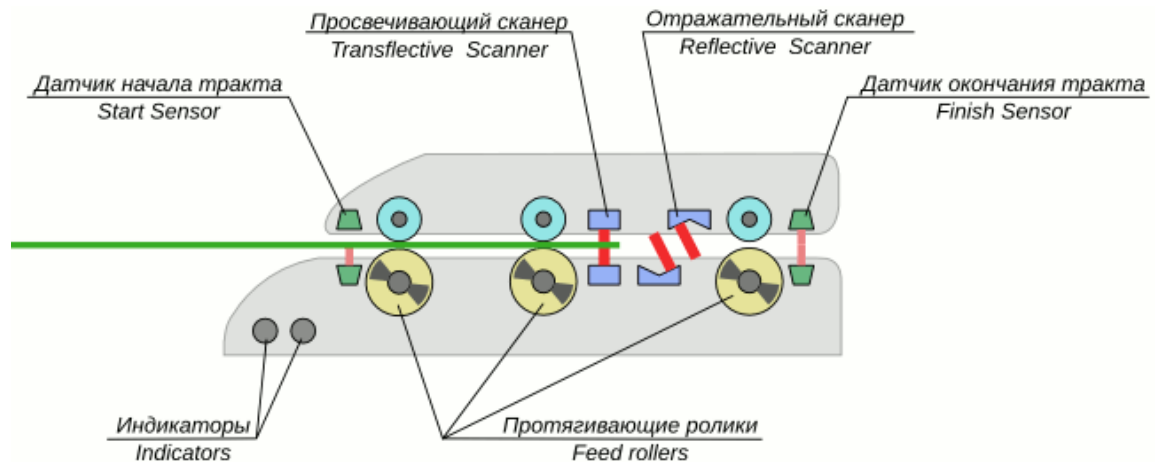


Рис.1.1.2 Оптичний сенсор в складі купюро-приймача

При проходженні купюри через оптичні сенсори, які складаються з випромінювача світла та приймача, інтенсивність світла, яке надходить на приймач, падає. В залежності від кількості введених купюр, інтенсивність світла змінюється. Недоліком такого методу є складність виявлення здвоєності при наявності пластикових прозорих віконних голограм в купюрах. Рис. А також складність виявлення для різних купюр світу, оскільки деякі з них можуть бути пластиковими. Конфігурація купюр не залежить від систем

виявлення підробки , дані системи мають бути налаштовані під існуючі купюри .



Рис.1.1.3. Купюра з пластиковою прозорою голограмою

1.2 Індустріальні системи контролю здвоєності

Такі датчики застосовують в типографіях , на прокаті пластикових листів, листів прозорого оргскла, прокату металевих листів. Наприклад типовий індустриальний оптичний датчик GS745 [15](Рис.1.2.1) можливо використовувати тільки для вимірювання ширини невеликого листа , або знаходження його кінця. Для контролю подачі та якості матеріалу сучасні підприємства обладнані багатьма датчика , які побудовані на різних фізичних принципах .



Рис.1.2.1 Оптичний датчик кромки GS745

На підприємствах застосовують ультразвукові датчики здвоєності , які побудовані на принципі вимірювання звукоізоляції . Датчики класифікуються за :

- формою;
- типом кріплення;
- наявністю блоку керування та індикації або сповіщення ;
- потужністю;
- типом вихідного сигналу ;
- типом та питомою вагою матеріалу для якого можуть бути застосовані
- частотою випромінюваного сигналу;
- вологостійкістю.

Датчики мають різну форму та конфігурацію , для застосування в різних умовах та місцях. Основному у вигляді циліндра з зовнішньою різьбою M18. Стандартна модифікація: приймач і вся вимірювальна частина знаходиться в M18 різьбовій втулці, довжиною всього 60,2 мм.

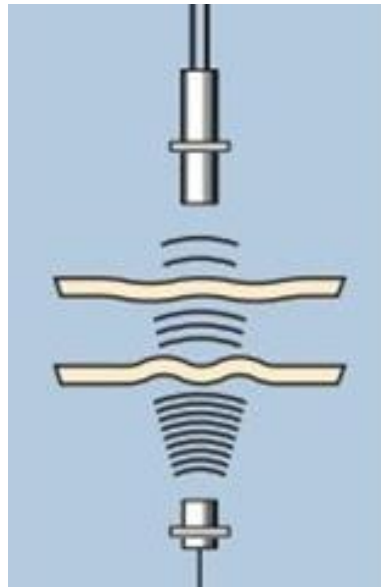


Рис.1.2.2 Схематичне зображення принципу роботи датчиків

Ультразвукові датчики надійно детектують наявність матеріалу в пристрої подачі. Подвійні або відсутні листи призводять до зупинки процесу друку або подачі матеріалу на подальшу обробку. Технологія гарантує, що виявлення не залежить від матеріалу листа (наприклад, тонкого паперу,

прозорих рулонів, картону та металевої плівки, включаючи пластмаси, метали і навіть блискучі або прозорі матеріали). В основному використовують ультразвук, так як детектування не залежить від прозорості або кольору матеріалу. В залежності від конфігурації можуть різну швидкість сканування, що дозволяє збільшити імовірність виявлення накладання двох листів, не зупиняючи конвеєр. Використовуючи датчики різних ультразвукових частот і потужності, можливо перевіряти набагато товстіші матеріали ніж папір, та з більшими питомими густинами. Кожний датчик має функцію налаштування чутливості, та налаштування порогу для детектування.

Одним з таких датчиків, є детектор подвійного листа [17]. Призначений для визначення наявності та кількості аркушів (один, два, жодного) між передавачем і приймачем. Детектування здвоєного аркуша на базі ультразвукової технології.



Рис.1.2.3. Ультразвуковий датчик UM18

Забезпечує наступні характеристики :

- Детектування здвоєного аркуша при роботі з плівкою, і гофрованим картоном ;
- Монтажна відстань 37-43 мм;
- Автоматична настройка, відсутність необхідності в навчанні;

- Відсутність залежності від кольору та розміру об'єктів;
- Два дискретних виходу «подвійний аркуш» і «відсутність листа».

Ультразвуковий датчик посилає високочастотні "пучки" імпульсів, які проходять через матеріал і приймаються приймачем з іншого боку. Якщо сигнал проходить більш ніж через 2 листа, то він настільки слабкий, що вже не фіксується приймачем. Рекомендована відстань між передавачем і приймачем становить 40 мм. При необхідності, цей інтервал можна налаштувати в діапазоні від 20 до 60 мм. Стандартний робочий діапазон питомої ваги листового матеріалу лежить в діапазоні від 20 г / м² до 1200 г / м². Дуже тонкі матеріали, такі як папір для друку з вагою на одиницю площі менше 20 г / м², визначаються з використанням "тонких" налаштувань в стандартних робочих діапазоні. З цього можна зробити висновок, що сенсор підходить для роботи з дуже широким спектром матеріалів.

Для паперу і тонкої плівки, контроль подвійного листа проводиться перпендикулярно матеріалу; його парусність не впливає на контроль. У разі гофрованих карт, тонкого листового металу, напівпровідникових пластин або товстих пластикових плівок (наприклад, кредитних карт), датчик повинен бути встановлений під певним кутом нахилу α до матеріалу. Відхилення датчиків по осі не має перевищувати, Рис.1.2.4.

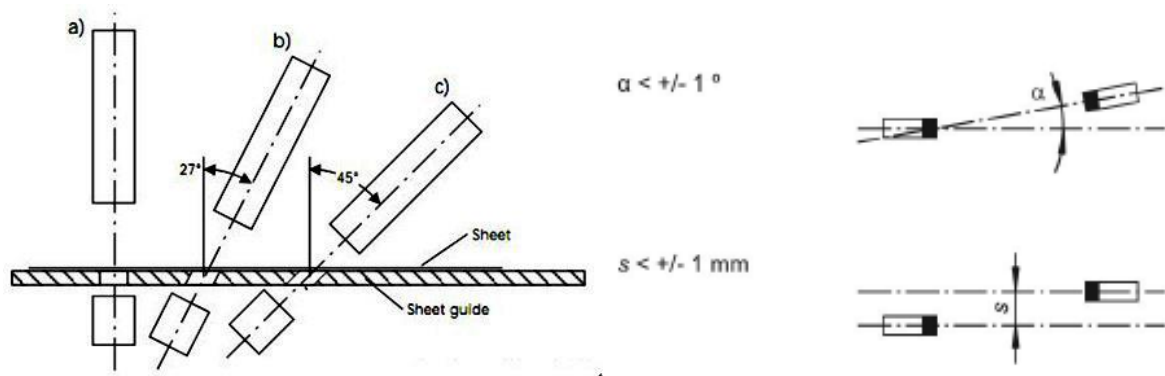


Рис.1.2.4. Варіанти постановки датчика, допустимі відхилення по осі



Рис .1.2.6 Встановлений в робоче положення датчик

Всі моделі які наявні у вільному продажу , відрізняються лише функціоналом , габаритами , та методами закріплення

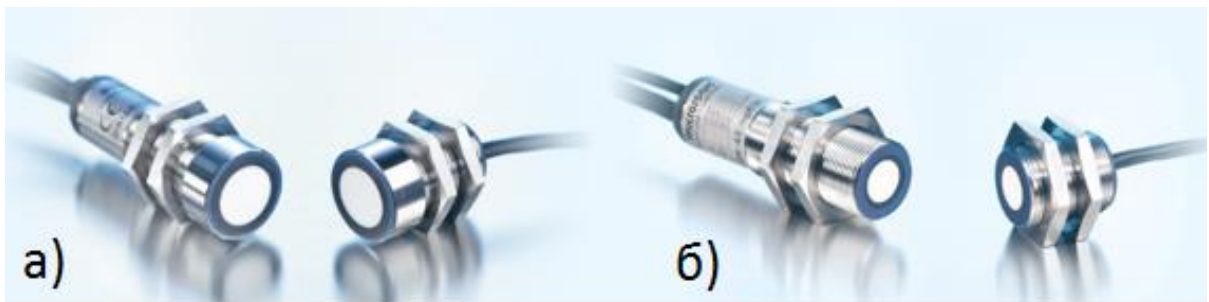


Рис 1.2.7 Модифікації датчиків а) DBK-5 б) DBK-4 [18]

В даній галузі знаходять місце датчики шва , кінця листа та етикеток [19]. Наприклад датчик кромки BKS , є однією з модифікацій датчика здвоєності листа Це датчик у вигляді "скоби" для визначення краю звуконепроникних матеріалів, таких як фольга або папір.

BKS підходить для контролю намотування плівки з високою прозорістю, чутливих матеріалів, матеріалів з різної прозорістю. У нижній частині датчика так само розташовується ультразвуковий випромінювач, який посиляє звук короткими імпульсами на приймач, розташований у верхній частині датчика. За наявності кромки між приймачем та випромінювачем , як наслідок, сигнал слабшає. Така конфігурація може використовуватись в якості кінцевих вимикачів для станків з числовим програмним управлінням.

З шириною всього 30мм і глибиною 33мм він має компактне виконання корпусу , та може використовуватись для різноманітних задач.



Рис.1.2.8. Датчик кромки BKS

Детектор етикеток наклеєних на несучу підкладку. Дана ситуація знову повторює типовий детектор здвоєного листа.



Рис .1.2.9 Детектор етикеток

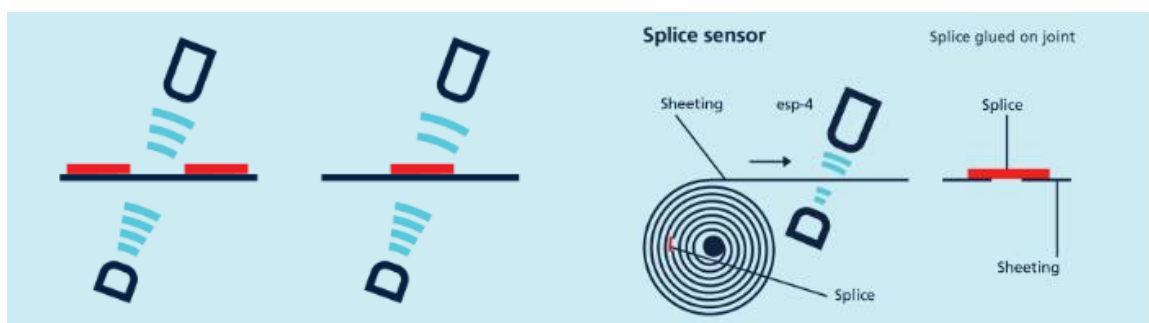


Рис 1.2.10 Принцип роботи детектора етикеток

В усіх розглянутих конфігурація датчиків , можна підкреслити те , що система складається з випромінювача та приймача , розташованих навпроти один одного. Передавач посилає акустичний імпульс, який перетинає границю першого листа, при цьому амплітуда сигналу послаблюється. Для

детектування наявності або здвоєності, потрібно прокалібрувати систему, задавши поріг сигналу при наявності одного листа. У разі подвійного листа сигнал послаблюється ще більше, оскільки сигнал відбивається від першого і другого листа, послаблюючись таким чином [20](Рис.1.2.10).

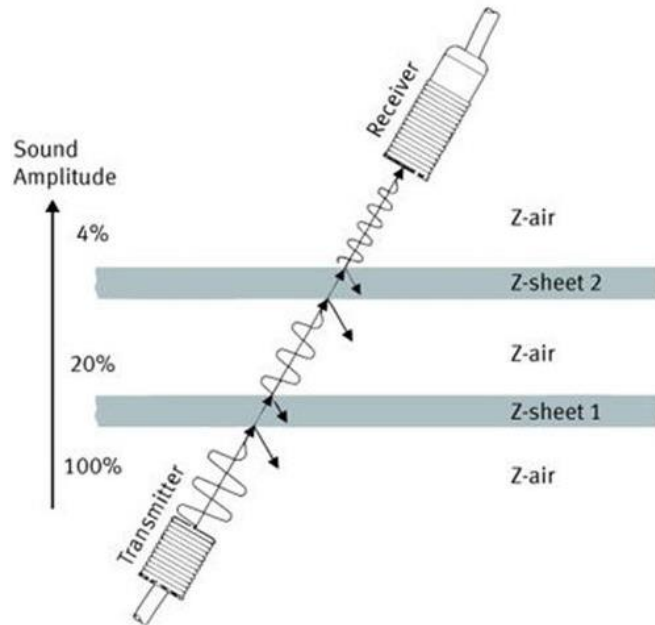


Рис.1.2.10 Принцип роботи сенсора здвоєності.

Ці зміни в амплітуді дозволяють датчику чітко розрізняти різницю. Приклад часової розгортки сигналу з сенсора приведено на рис 1.2.11 [20].

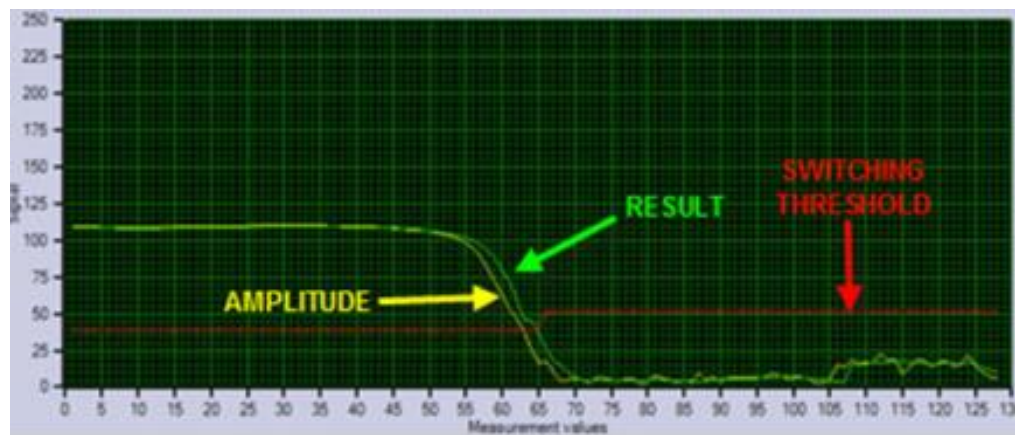


Рис.1.2.11. Часова розгортка сигналу отриманого з датчика

AMPLITUDE - це необроблене значення вимірної амплітуди - без обробки сигналу. RESULT – це сигнал AMPLITUDE після внутрішньої обробки, фільтрації сигналів. Надалі сигнал використовується для прийняття рішення

Switching threshold - відповідає значенню встановленому в програмі і відображає, і відображає поріг для значення амплітуди . Для різних матеріалів (також різних товщин), які мають різний акустичний імпеданс , потрібно використовувати перетворювачі з різними резонансними частотами. Форма зонduючого сигналу – радіоімпульс , заповнений синусоїдальним сигналом .

1.3 Висновок

Для контролю порушення трансферу купюр в системах купюро приймачів використовують в основному механічні та оптичні системи . Використання таких систем не дозволяє якісно відділяти одну купюру від двох , за деяких не змінних факторів, а саме:

- колір купюр;
- матеріал ;
- наявність прозорих частин ;
- наявність металічних не прозорих для світла частин .

В індустрії вже існують ультразвукові сенсори , які використовують для контролю здвоєності , конструкція таких сенсорів відрізняється від конструкції, яка б підходила для використання в системах банківського обігу коштів. Принцип роботи сенсора , що розглядається в роботі буде базуватись на принципі роботи даних сенсорів.

РОЗДІЛ 2

ФІЗИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ КУПЮР

2.1 Формування акустичного поля у вимірювальній трубі

Нехай у нас заданий вимірювальний пристрій, характеристики стін якого дозволяють вважати його акустичною трубою.

Розглянемо Рис. 2.1.1

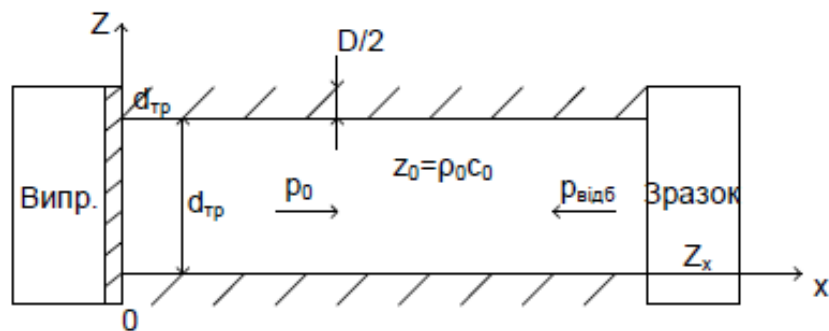


Рис 2.1.1

Труба зображена круглим протяжним порожнім циліндром с жорсткими стінками, з діаметром в умовах відсутності теплопровідності:

$$d_{mp} < \frac{\lambda}{2} \quad (2.1.1)$$

Встановлений у лівому торці труби джерело звуку Д і створює у трубі плоску хвилю. Задача розглядається у площині XOZ . Припустимо, що :

- Звукове поле у трубі залежить від координат Z , X і t так, що звуковий потенціал виразу гармонійної функції за часом може бути записаний у вигляді :

$$\Phi(z, x, t) = \phi(x, z) e^{j\omega t} ; \quad (2.1.2)$$

- Поле задовольняє рівнянню Гельмгольца (2.1.3) відносно потенціалу $\phi(x, z)$ в декартових координатах :

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k^2 \cdot \phi = 0, k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi \cdot f}{c}; \quad (2.1.3)$$

- Загальним розв'язком рівняння Гельмгольца (2.1.3) є добуток часткових рішень за координатами $Z(z)$ і $X(x)$ так, що :

$$\phi(x, z) = Z(z) \cdot X(x), \quad (2.1.4)$$

а загальна хвильова функція для координат z і x запишеться з урахуванням стаціонарності за часом $e^{j\omega t}$ як :

$$\Phi(z, x, t) = \phi(x, z) \cdot e^{j\omega t} = (A \cdot e^{+jk_z z} + B \cdot e^{-jk_z z}) (C \cdot e^{+jk_x x} + D \cdot e^{-jk_x x}) \cdot e^{j\omega t}. \quad (2.1.5)$$

Коефіцієнти A, B, C, D визначаються граничними умовами і характеристиками джерела і зразку. І якщо умови для випромінювача визначені і відомі, то умови і властивості зразку в правому торці труби невідомі і повинні бути знайдені. В задачах визначення імпедансних характеристик часто необхідно визначити саме Z_x і граничні умови. Нехай задано, що стінки труби акустично жорсткі. Тоді за координатою Z , граничні умови у лівому торці записано як:

$$\left. \frac{\partial Z(z)}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial Z(z)}{\partial z} \right|_{z=d_{mp}} = 0 \quad (2.1.6)$$

Рівняння Гельмгольца (2.1.3) розв'язується послідовно, методом Фур'є у граничних умовах.

$$\Delta \Phi + k^2 \cdot \Phi = 0, \quad (2.1.7)$$

$$\text{де } \Delta = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2}$$

$$\phi(x, z) = Z(z) \cdot X(x) = \Phi(x, z) \quad (2.1.8)$$

$$\frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} \cdot Z(z) + \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} \cdot X(x) + k^2 \cdot X(x) \cdot Z(z) = 0 \quad (2.1.9)$$

Розділивши кожний доданок на добуток $X(x) \cdot Z(z)$, рівність набуває вигляду :

$$\frac{1}{X(x)} \cdot \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} + \frac{1}{Z(z)} \cdot \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} + k^2 = 0 \quad (2.1.10)$$

Перший доданок (2.1.10) залежить лише від X , а другий – тільки від Z .

Уведемо позначення :

$$\frac{1}{X(x)} \cdot \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} = -\gamma_n^2, \quad \frac{1}{Z(z)} \cdot \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} + k^2 = \gamma_n^2. \quad (2.1.11)$$

$$\text{Тоді} \quad \begin{cases} \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} + \tilde{k}^2 \cdot Z(z) = 0 \\ \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} + \gamma_n^2 \cdot X(x) = 0 \end{cases}, \quad (2.1.12)$$

$$\text{де } \tilde{k}^2 = k^2 - \gamma_n^2.$$

а) Часткове рішення по осі хвилеводу камери X можна записати :

$$X_n(x) = C \cdot e^{+jk_x x} + D \cdot e^{-jk_x x}, \quad (2.1.13)$$

де $C \cdot e^{+jk_x x}$ - хвиля, що розповсюджується у напрямку початку координат,

$D \cdot e^{-jk_x x}$ - хвиля, що розповсюджується від початку координат у напрямку осі X .

Так як труба по осі X обмежена справа матеріалом зразку – відбивача, то першим доданком знехтувати не можна.

б) Часткове рішення для осі Z записано у вигляді:

$$Z_n(z) = A \cdot \sin\left(\sqrt{k^2 - \gamma_n^2} \cdot z\right) + B \cdot \cos\left(\sqrt{k^2 - \gamma_n^2} \cdot z\right) \quad (2.1.14)$$

Варто зауважити рівність нулю коливальної швидкості на границях розділу „середовище – стінка труби”.

$$\frac{\partial \Phi(z, x)}{\partial n} = \frac{\partial \Phi}{\partial n} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial Z(z)}{\partial z} \Big|_{z=0, z=d_{mp}} = 0, \quad (2.1.15)$$

$$A = A_n, B = B_n$$

$$\frac{\partial Z(z)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \left(\sqrt{k^2 - \gamma_n^2}\right) \cdot \left[A_n \cdot \cos\left(\sqrt{k^2 - \gamma_n^2} \cdot z\right) + B_n \cdot \sin\left(\sqrt{k^2 - \gamma_n^2} \cdot z\right) \right] \Big|_{z=0} = \left(\sqrt{k^2 - \gamma_n^2}\right) \cdot A_n = 0$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \text{або } k^2 = \gamma_n^2, \\ \text{або } A_n = 0. \end{cases}$$

Нехай $B_n = 0$, тоді :

$$\left. \frac{\partial Z(z)}{\partial z} \right|_{z=d} = \left(\sqrt{k^2 - \gamma_n^2} \right) \cdot \left[A_0 \cdot \cos \left(\sqrt{k^2 - \gamma_n^2} \cdot d_{mp} \right) + B_n \cdot \sin \left(\sqrt{k^2 - \gamma_n^2} \cdot d_{mp} \right) \right] \Big|_{z=d_{mp}} =$$

$$= \left(\sqrt{k^2 - \gamma_n^2} \right) \cdot B_n \cdot \sin \left(\sqrt{k^2 - \gamma_n^2} \cdot d_{mp} \right) = 0.$$

Тут можливі варіанти:

$$\begin{cases} \text{або } \sin \left(\sqrt{k^2 - \gamma_n^2} \cdot d_{mp} \right) \Rightarrow \sqrt{k^2 - \gamma_n^2} \cdot d_{mp} = \pi \cdot n - \\ \text{або } B_n = 0 \end{cases} \quad (2.1.16)$$

– це дисперсійне рівняння (За умови $B_n = 0$ - коливань не буде взагалі).

Далі : $\sqrt{k^2 - \gamma_n^2} = \frac{\pi \cdot n}{d_{mp}}$ з точністю до знаку. Загальне рішення прийме вигляд :

$$\Phi(z, x, t) = \phi(x, z) \cdot e^{j\omega t} = B_n \cdot \cos \left(\frac{n \cdot \pi}{d_{mp}} \cdot z \right) \cdot e^{j\omega t} \cdot \left[e^{-jk_x x} + e^{+jk_x x} \right] \quad (2.1.17)$$

де B_n - довільна стала, γ_n - величина, що має розмірність хвильового числа, а загальний розв'язок :

$$\Phi_\Sigma = \sum_{n=0}^N \Phi = \sum_{n=0}^N B_n \cdot \cos \left(\frac{n \cdot \pi}{d_{mp}} \cdot z \right) \cdot e^{j\omega t} \cdot \left[C \cdot e^{-jk_x x} + D \cdot e^{+jk_x x} \right]. \quad (2.1.18)$$

Розглянемо дисперсійне відношення :

$$\sqrt{k^2 - \gamma_n^2} = \frac{\pi \cdot n}{d_{mp}} \Rightarrow \gamma_n^2 = k^2 - \left(\frac{\pi \cdot n}{d_{mp}} \right)^2, \quad (2.1.19)$$

$$\gamma_n = \sqrt{k^2 - \left(\frac{\pi \cdot n}{d_{mp}} \right)^2} = k \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\pi \cdot n \cdot c}{d_{mp} \cdot \omega} \right)^2}, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

$\left[\frac{\pi \cdot n}{d_{mp}} \right]$ - це розмірність частоти. Позначимо її $\omega_{кр\ n} = \frac{\pi \cdot n}{d_{mp}}$.

$$\gamma_n = k \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{кр\ n}}{\omega} \right)^2}.$$

Можливі два випадки : 1) $\omega > \omega_{кр\ n}$ і 2) $\omega < \omega_{кр\ n}$.

1) Якщо $\omega > \omega_{кр\ n}$, то γ_n - дійсна частина;

2) Якщо $\omega < \omega_{kp\ n}$, то γ_n - уявна частина, хвилі затухають.

і якщо $\gamma_n = \frac{\omega}{a_n}$, то

$$a_n = \frac{\omega}{\gamma_n} = \frac{\omega}{k \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{kp\ n}}{\omega} \right)^2}} \quad (2.1.20)$$

З цього випливає, що вздовж каналу труби можуть розповсюджуватися хвилі, амплітуда яких непостійна за поперечним перетином труби, кожна хвиля розповсюджується не змінюючи форми зі своєю частотно залежною фазовою швидкістю.

а) Нехай $n = 0 \Rightarrow \omega_0 = 0 \Rightarrow a_n = \frac{\omega}{k} = c$ - звичайна плоска хвиля з фазовою швидкістю c .

б) Нехай $n = 1 \Rightarrow \omega_1 = \frac{\pi \cdot c}{d_{mp}} \Rightarrow a_n = \frac{\omega}{k \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\pi \cdot c}{d_{mp} \cdot \omega} \right)^2}},$

$$\text{а } \Phi_{\Sigma} = B_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{d_{mp}} \cdot z\right) \cdot [C \cdot e^{-jk_x x} + D \cdot e^{+jk_x x}] \cdot e^{j\omega t} \quad (2.1.21)$$

хвиля, в якій вихідний розподіл амплітуди має форму косинусу.

Умова $\frac{\omega_{kp\ n}}{\omega} < 1$ - умова обов'язкова для існування поля у хвилеводі при $n = 0$

$$\frac{\pi \cdot c}{d_{mp} \cdot \omega} < 1 \Rightarrow \frac{\pi \cdot c}{d_{mp} \cdot 2\pi \cdot f} = \frac{\lambda}{2d_{mp}} < 1 \quad (2.1.22)$$

$\frac{\lambda}{2} < d_{mp} \Rightarrow d_{mp} > \frac{\lambda}{2}$ - загальна вихідна умова.

Таким чином, поле в трубі, що працює по нульовій моді коливань випромінювача, може бути записано як :

$$\gamma_0 = k$$

$$\Phi(z, x, t) = \Phi(x, t) = [C \cdot e^{-jk_x x} + D \cdot e^{+jk_x x}] \cdot e^{j\omega t} \quad (2.1.23)$$

де $C \cdot e^{-jk_x x}$ - пряма хвиля $= p_0 \Leftrightarrow \Phi_0$, $D \cdot e^{+jk_x x}$ - відбита хвиля $= p_{від} \Leftrightarrow \Phi_{від}$,

$e^{j\omega t}$ - в подальшому гармонійну залежність вважаємо стаціонарною і нехтуємо нею, але пам'ятаємо про її присутність.

$$\Phi(x, t) = [C \cdot e^{-jk_x x} + D \cdot e^{+jk_x x}]. \quad (2.1.24)$$

2.2 Вимірювання звукоізоляції в трубах

В акустичній вимірювальній трубці можливо визначити звукоізоляцію малих зразків матеріалів і конструкцій. Для цього треба визначити звуковий тиск за допомогою малогабаритного приймача по обидві сторони досліджуваного зразка (мал. 4.5). Тут важливо використання в якості поглинач Z_x – матеріалу з дуже малим значенням коефіцієнта відбиття V :

$$V < 0.1 - 0.15.$$

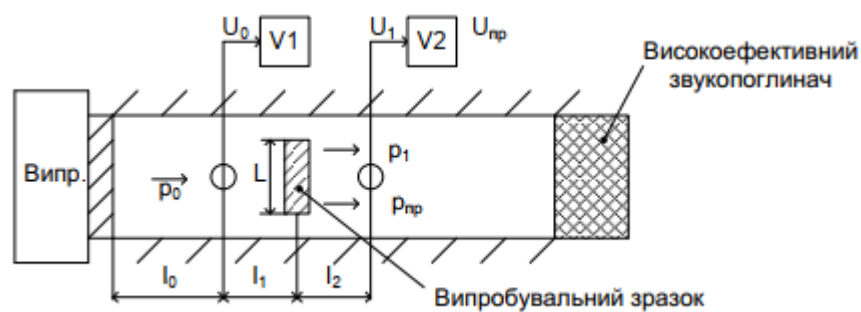


Рис.2.2.1 Принцип розстановки елементів для вимірювання

l_2 – відповідає умові :

$$0.6\lambda < l_2 << \frac{L^2}{4\lambda}$$

де L – розмір зразка,

λ – довжина хвилі.

Звукова ізоляція зразка визначається за формулою:

$$ZI = 20 \lg \frac{p_1}{p_{пр}},$$

де p_1 – тиск, що сприймається приймачем при відсутності досліджуваного зразка, $p_{пр}$ – тиск, пройдений через перешкоду сигналу – тобто в присутності зразка.

$$3I = 20 \lg \frac{U_2}{U_{\text{пр}}}$$

2.3 Висновок

Для формування плоскої хвилі в трубі потрібно зберегти умову:

$$\frac{\lambda}{2} < d_{\text{тр}} \Rightarrow d_{\text{тр}} > \frac{\lambda}{2}$$

Важливою задачею є вибір розміру труби , так як в поперечному перерізі амплітуда хвилі не постійна.

Для вимірювання звукоізоляції потрібні два малогабаритні перетворювачі, які менші або рівні довжині хвилі. Для гасіння реверберації в трубі , на торці потрібно застосовувати високоефективний звуко-поглинаючий матеріал.

РОЗДІЛ 3

ТЕХНІЧНЕ КОНСТРУЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СЕНСОРА ЗДВОЄНОСТІ

3.1 .Принцип вимірювання рівня сигналу.

Через складність поширення звукових хвиль в конструкціях даного типу, наявні пере-відбиття в трубі після випромінювання сигналу перетворювачем.

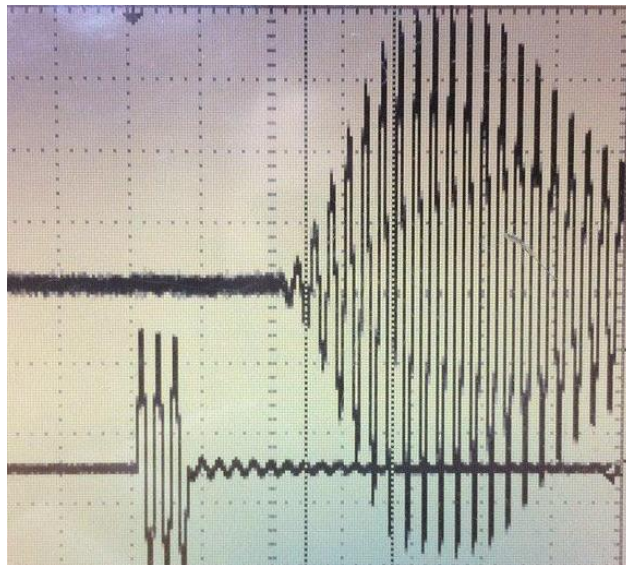


Рис. 3.1.1. Пере-відбиття випроміненого сигналу

Цим ускладняється процедура вимірювання рівня сигналу, а саме нестабільність та непередбачуваність рівня сигналу при введенні купюри в канал. При проведенні дослідження було помічено проміжок часу 100мкс, на якому рівень сигналу пропорційно введеним купюрам, (3.1.1–3.1.3) (виділено курсорами проміжок часу). З цього можна зробити висновок, що вимірювання потрібно проводити по стробу, з тривалістю імпульсу 100мкс з похибкою не більше 10мкс.

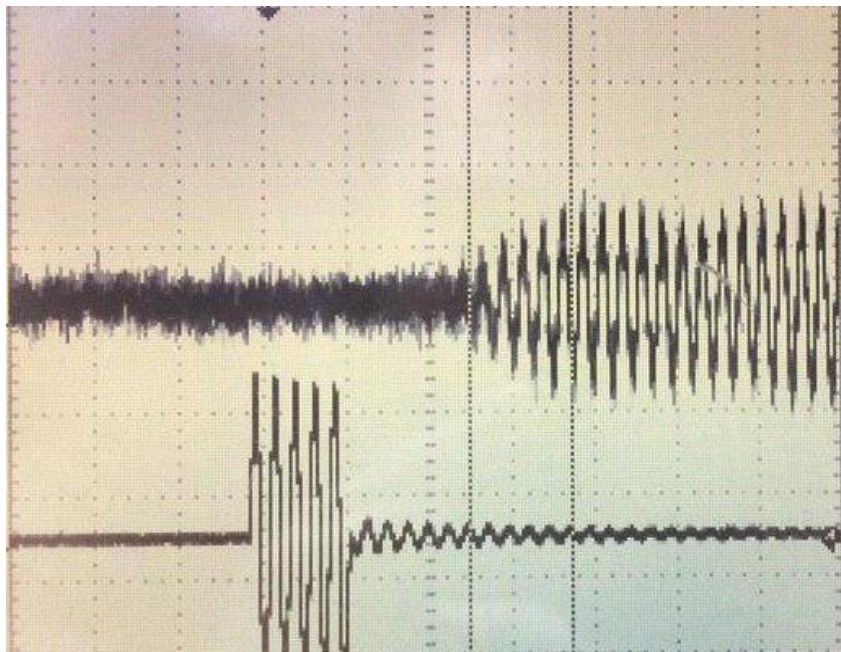


Рис.3.1.2. Сигнал при введенні однієї купюри в канал

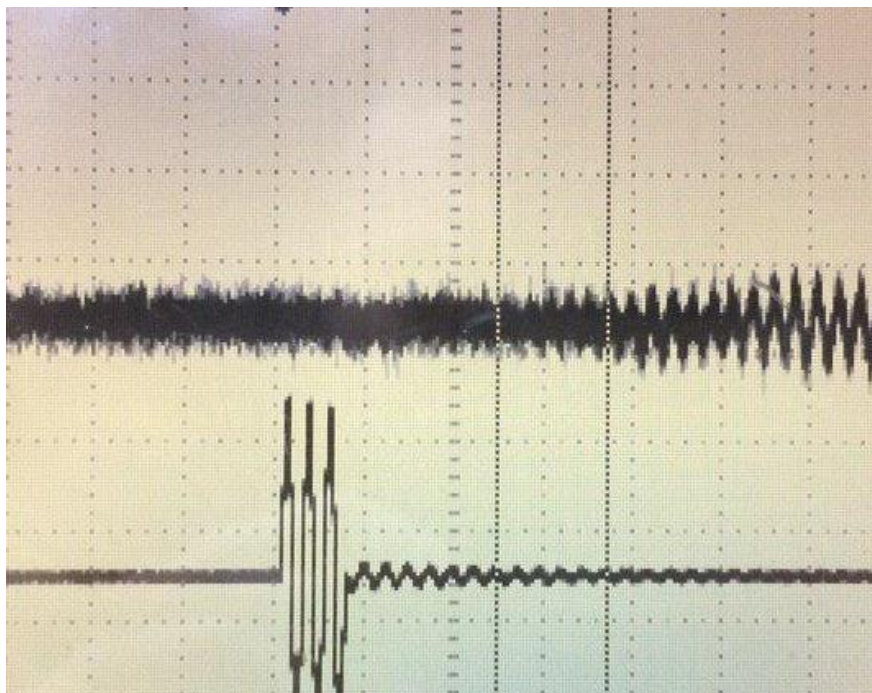


Рис.3.1.3. Сигнал при введенні двох купюр в канал

3.2 Структурна ,функціональна та електрична схема пристрою

На рис.3.2.1 представлена структурна схема пристрою.

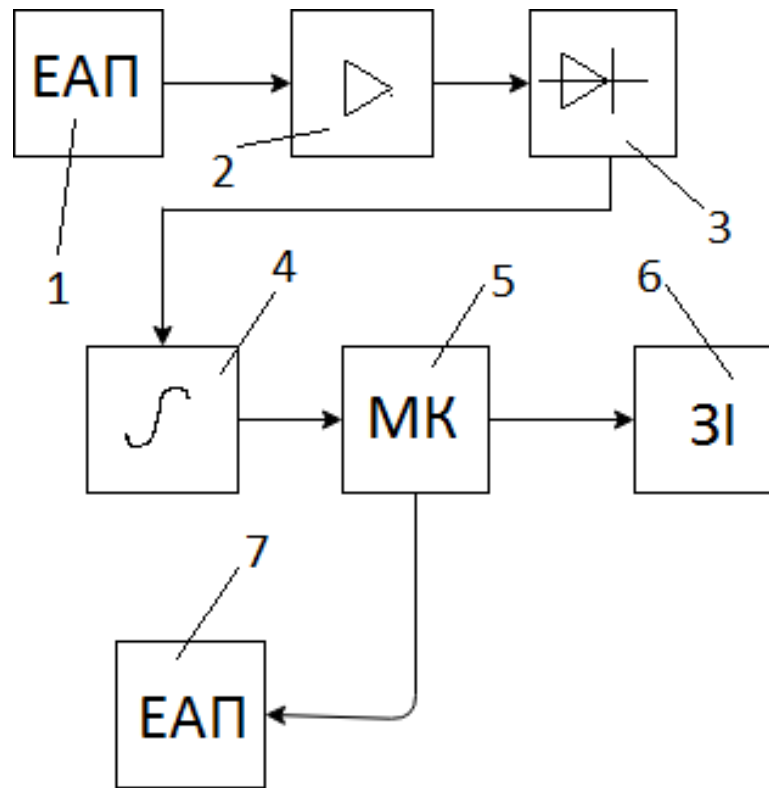


Рис.3.2.1 Структурна схема пристрою

Схема включає в себе два електро-акустичні перетворювачі – 1,7, в якості яких використано п'єзо електричні перетворювачі на частоту 41 кГц. Перетворювачі закріплені один навпроти одного в конструкції хвилеводу, оскільки низька чутливість перетворювачів не дозволяє використовувати вихідний сигнал для обробки і прийняття рішення, без підсилення до необхідного рівня. Для цього в схему включено попередній підсилювач – 2, який повинен мати достатній коефіцієнт підсилення, підсилений сигнал надходить до детектора – 3 та інтегратора – 4, для перетворення змінної напруги в постійну, для подальшого вимірювання. Після детектора сигнал надходить до мікроконтролера – 5, обробляється, та сигналізує результат за допомогою звукового індикатора – 6. Для отримання якісного співвідношення сигнал/шум, в схему пристрою потрібно включити ФВЧ та ФНЧ, за допомогою яких буде реалізовано АЧХ підсилювача (Рис.3.2.2).

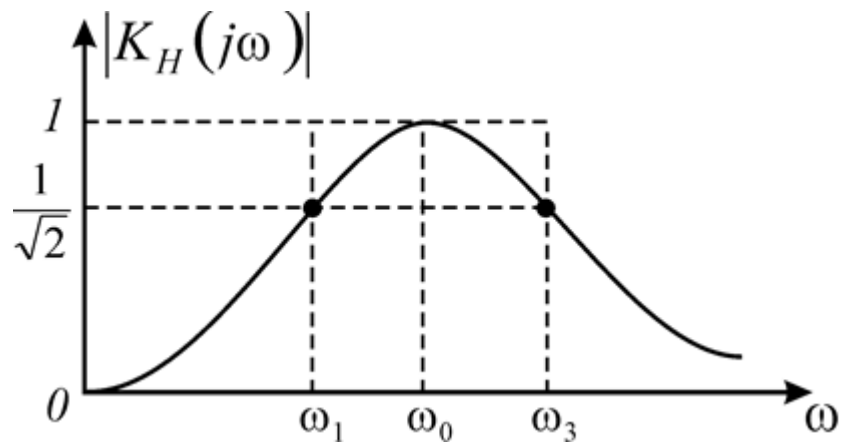


Рис.3.2.2 АЧХ підсилювача

Для отримання великих коефіцієнтів підсилення доцільно використати три каскади покрокового підсилення. Дані міркування відображує функціональна схема пристрою (Рис.3.2.3)

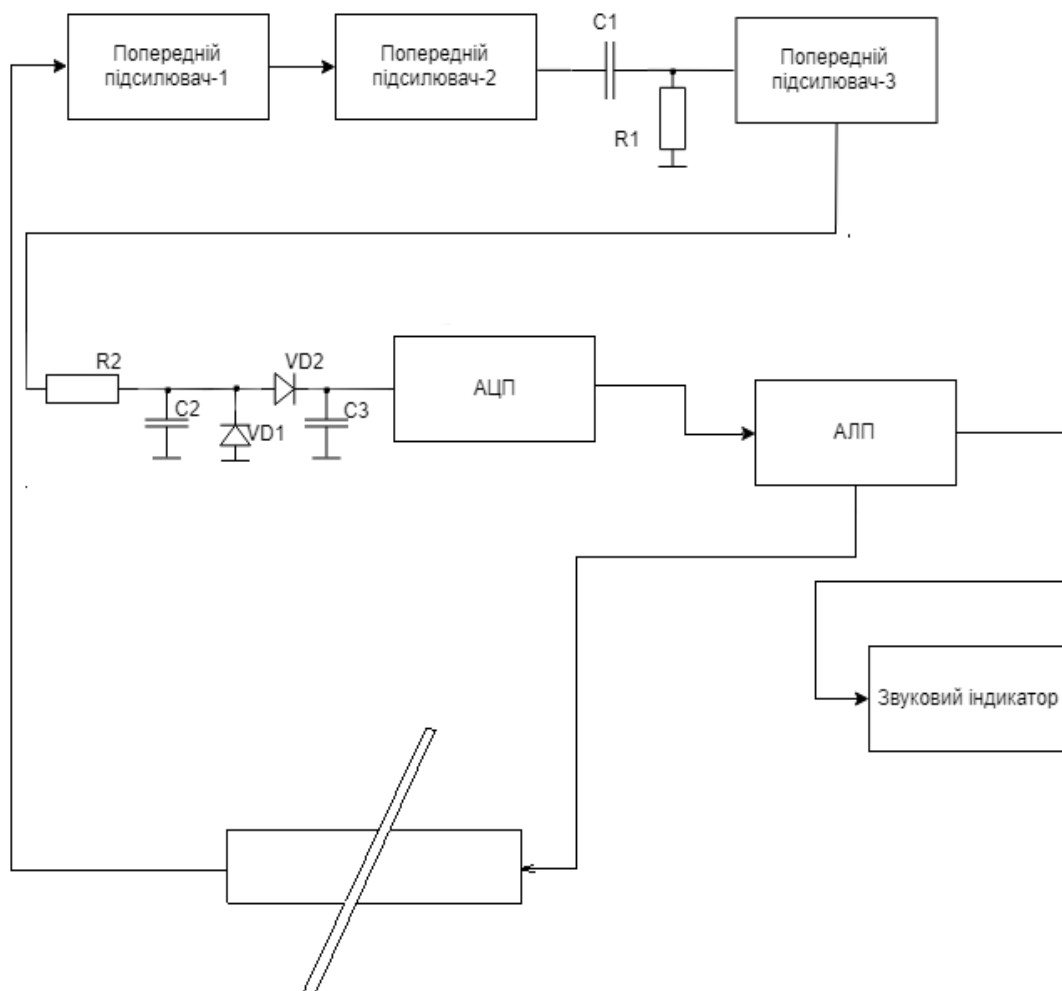


Рис.3.2.3. Функціональна схема пристрою

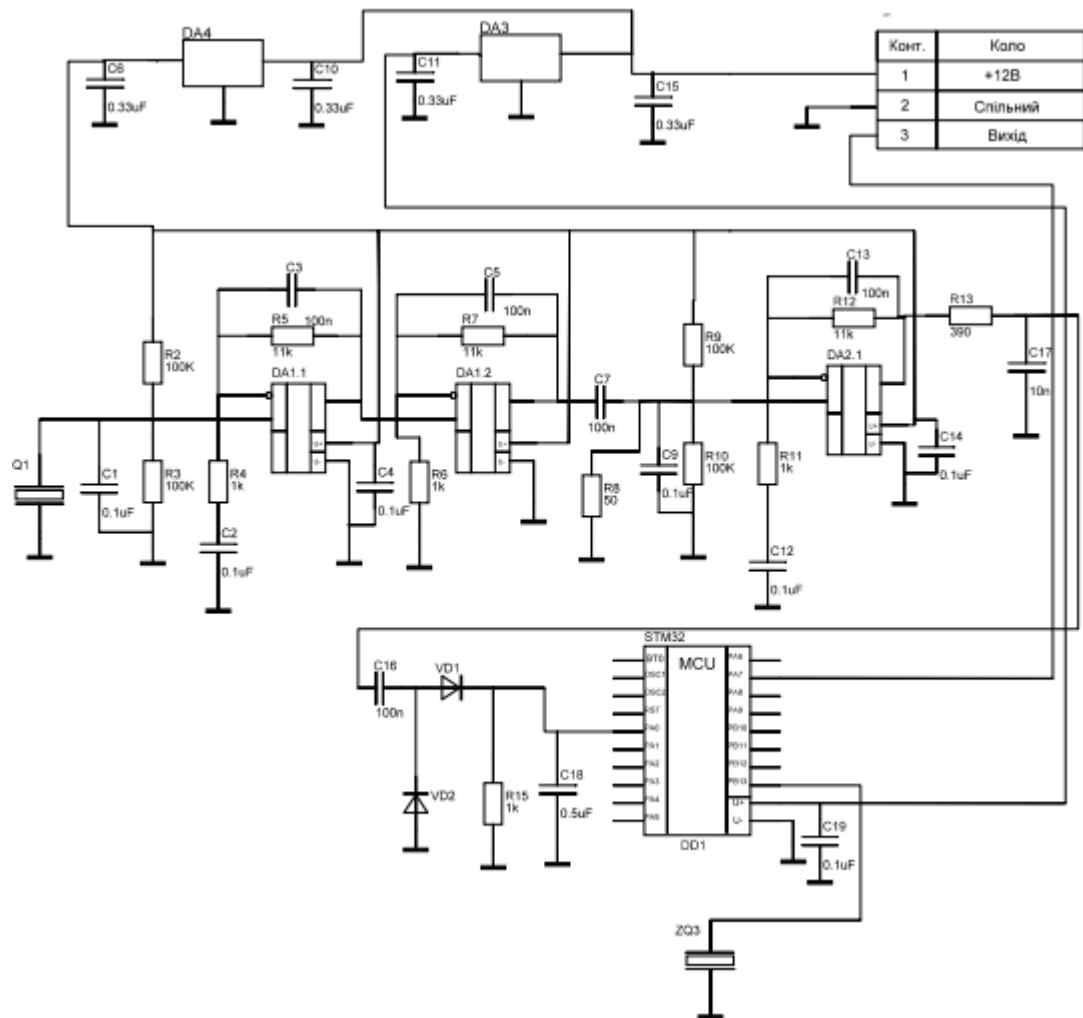


Рис.3.2.4. Схема електрична принципова

На рис.3.2.4 зображена повна схема електрична принципова сенсора .

3.3 Конструктивне рішення акустичного оформлення сенсора.

За принципами вимірювання поля в трубі , які були викладені в попередньому розділі було розроблено конструкцію сенсора (Рис.3.3.1-3.3.2) , та дорацьовано експериментальним шляхом. Конструкція являє собою конструктивну одиницю транспортного каналу купюр, та повинна вмонтовуватись як частина цього каналу , через яку проходить купюра . Місце в яке повинний вмонтовуватись сенсор , залежить від конструкції купюро приймача.

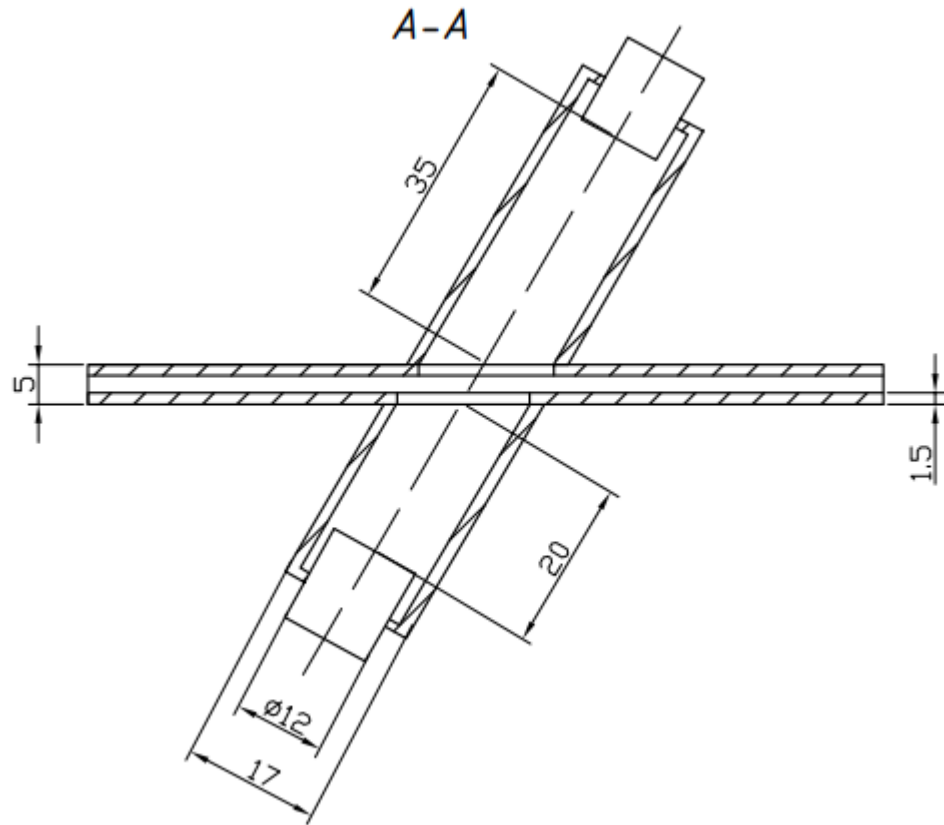


Рис.3.3.1 Конструкція сенсора вид в розрізі з боку

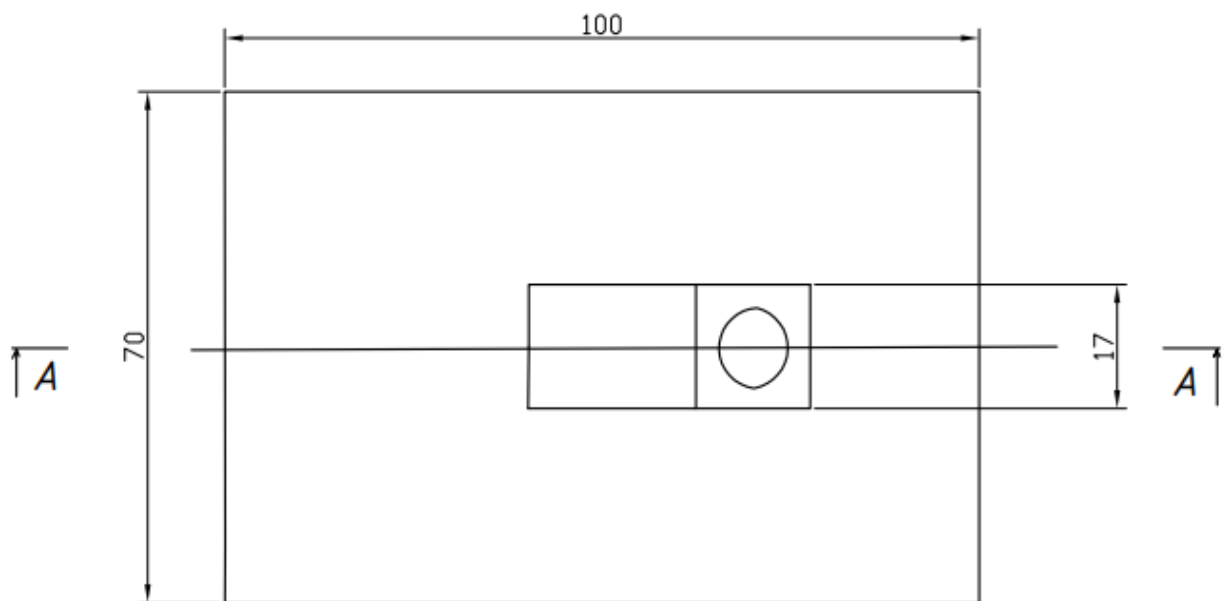


Рис. 3.3.2. Конструкція сенсора вид зверху

3.4 Розрахунок та вибір компонентів схеми пристрою.

3.4.1 Попередній підсилювач

Для розробки сенсору було обрано ЕАП з резонансною частотою 41кГц. ЕАП повинні збуджуватись на частоті резонансу, яка вказана в технічній документації, як можна ближче по частоті, для того, щоб забезпечити найбільшу потужність. Сигнал збудження ЕАП може бути згенерований за допомогою порту мікроконтролера, шляхом генерації його через ШИМ або керування портом вводу та виводу з частотою 41кГц.

Оскільки ультразвуковий сигнал поширюється в повітрі під час передачі, інтенсивність сигналу зменшується з відстанню через поглинання в повітря або якщо в канал введена купюра. Щоб вирішити дану проблему, доречно застосувати підсилювач. В якості підсилювача можливо застосовувати операційні підсилювачі. Проблема з ультразвуковими перетворювачами полягає в тому, що вони будуть продовжувати коливатися після вимкнення збуджуючого сигналу. Дані коливання відбуваються через резонансну поведінку перетворювача. Також перетворювач, який вбудований в монолітну конструкцію, буде передавати коливання на прийомний перетворювач, цим зумовлена мінімальна відстань між перетворювачами, та обов'язкова затримка перед вимірюванням сигналу, який надійшов до прийомного перетворювача, таким чином, щоб власні коливання перетворювача встигали загасати за час, проходження звуковою хвилею відстані між випромінювачем та приймачем. В даному випадку це створюватиме завади, які накладатимуться на прийнятий сигнал, та спотворюватимуть його.

Вихідний сигнал з виходу ЕАП (Рис. 3.3.4.1) може коливатись в межах 0.5-2мВ.



Рис 3.4.1.1 Електро-акустичний перетворювач

Тож сумарний коефіцієнт підсилення каскадів підсилювачів слід обирати, опираючись на найменший рівень вихідного сигналу ЕАП (коли в канал введено дві купюри), так щоб на вхід детектора надходив сигнал не менший чим напруга зміщення діода -0.7В . Тобто, при підсиленні сигналу найбільшого рівня з ЕАП(коли канал вільний), при даному коефіцієнті підсилення, вихідний сигнал може вводити наступні каскади підсилення в насичення. Оскільки на вихідних контактах ЕАП потрібно забезпечити режим холостого ходу, потрібно навантажити ЕАП на безкінечно великий опір наступного каскаду. Для узгодження опорів можливо не застосовувати витоковий повторювач на польовому транзисторі або буферний каскад на ОП. Сучасні ОП мають вхідний опір 10^9 Ом, що дозволяє навантажити ЕАП безпосередньо на вхід операційного підсилювача. У випадках підсилення сигналів, рівень яких визначається одиницями мВ, потрібні в основному великі коефіцієнти підсилення, що в свою чергу важко реалізувати. Для забезпечення стійкості операційного підсилювача при високих коефіцієнтах підсилення та складній топології схеми і друкованої плати, необхідно обирати мікросхеми з параметрами, які дозволяють їх використовувати в таких умовах. Перш за все ОП повинен мати задовільну полосу пропускання [9], низький рівень шумів та працювати при однополярному живленні. Одним з представником даного класу ОП є NE5532 [7с], який характеризується:

- низьким рівнем шуму $-5 \text{ нВ} \sqrt{\text{Гц}}$
- високою швидкістю наростання вихідної напруги -9 В/мкс

- широким діапазоном напруги живлення $\pm 15\text{В}$;
- широкою смугою пропускання $\sim 10\text{ МГц}$.

Після вибору ОП в корпусі DIP-8, було обрано схему каскадів попереднього підсилення, які базуються на неінвертуючому підсилювачі, з коефіцієнтом підсилення по постійному струмі -1. (Рис.3.4.1.2).

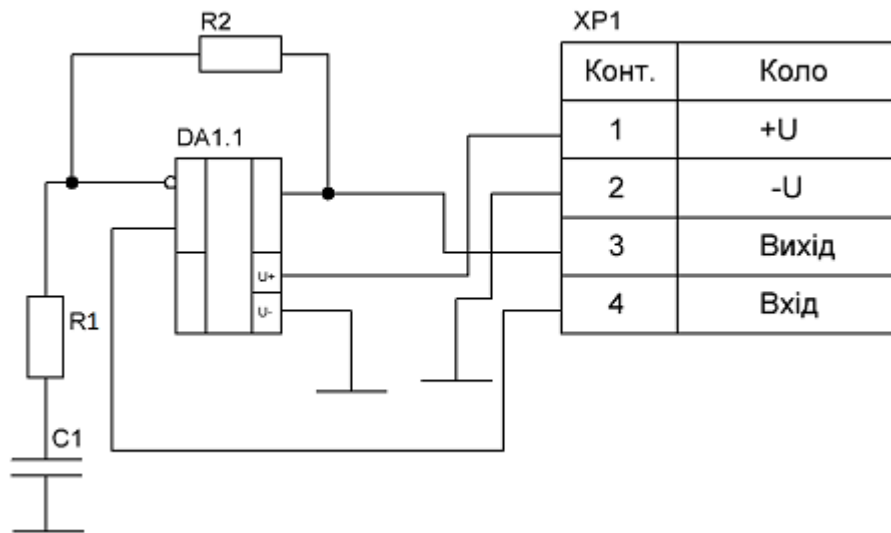


Рис.3.4.1.2 Схема неінвертуючого підсилювача

Для роботи ОП при однополярному живленні, потрібно змістити вхід постійною напругою [8], яка дорівнює :

$$U_{\text{зміщ.}} = \frac{U_{\text{жив.}}}{2} \quad (3.4.1.1)$$

Один з методів отримання напруги такого рівня для зміщення – використання резистивного дільника напруги [8] (Рис.3.4.1.3).

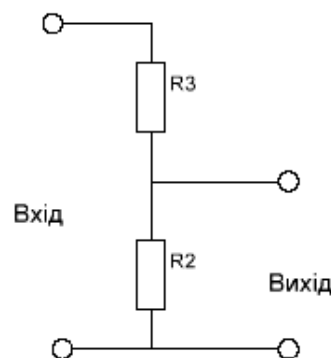


Рис.3.4.1.3 Резистивний дільник напруги

Напруга на виході [2] :

$$U_{вих.} = \frac{U_{вх.} R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.4.1.2)$$

Для мінімізації струму, що буде протікати через дільник, було обрано резистор R_1 великого номіналу, відносно нього розраховано резистор R_2 .

Після цього розраховується коефіцієнт підсилення. Щоб знизити вплив нестабільності напруги живлення, можна зашунтувати схему зміщення по змінному струмові [8] (Рис.3.4.1.4). Конденсатор C1 забезпечує фільтрацію пульсацій шини живлення, тим самим відновлюючи здатність ОУ послаблювати синфазні сигнали і вплив напруги живлення. Резистор R2 зашунтований конденсатором, за умови, що він ефективно шунтоватиме в полосі частот підсилювача.

Частота зрізу для фільтру [2]:

$$f_{зр} = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \quad (3.4.1.3)$$

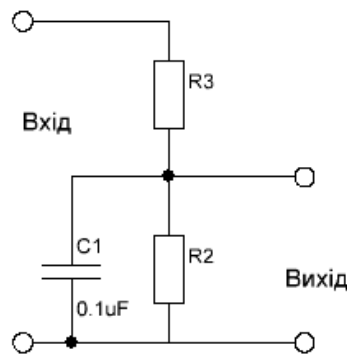


Рис.3.4.1.4 Шунтування дільника напруги

Вихідна напруга неінвертуючого підсилювача залежить від вхідної і відноситься як [9] :

$$\frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (3.4.1.4)$$

Коефіцієнт підсилення [9] по напрузі неінвертуючого підсилювача :

$$K_u = \frac{U_{вих.макс.} - U_{вих.мін.}}{U_{вх.макс.} - U_{вх.мін.}} \quad (3.4.1.5)$$

Номінали резисторів розраховуються з формули [9] :

$$K_u = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (3.4.1.6)$$

При виборі резисторів , від яких залежить коефіцієнт підсилення , потрібно звертати увагу на величину номіналу, вони не мають бути занадто великими , так як резистори утворюють нулі частотної характеристики разом з вхідною ємністю ОП, дане твердження перевіряється умовою [9]:

$$\frac{1}{2\pi(C_{\text{синф.}} + C_{\text{диф.}})(R_1 + R_2)} > \frac{K_{\text{один.}} \cdot \Delta f}{K_u} \quad (3.4.1.7)$$

Де, $\frac{K_{\text{один.}} \cdot \Delta f}{K_u}$ -відношення смуги пропускання при одиничному

підсиленні до обраного коефіцієнта підсилення.

Після перевірки ОП на стійкість, слід перевірити швидкість наростання сигналу на найбільшій частоті вхідного сигналу для запобігання спотворень (швидкість наростання сигналу в ОП може не відповідати розрахованій) , для перевірки використовують формулу [9] :

$$V = 2\pi \cdot f \cdot U_{\text{вих.макс}} \quad (3.4.1.8)$$

Для забезпечення коефіцієнту підсилення –1 для постійного струму , в схему включено конденсатор C_1 . Через це рівень постійної складової на виході ОП –дорівнює напрузі зміщення . В даному випадку це потрібно для того, щоб запобігти спотворень за рахунок підсилення постійної складової. Конденсатор C_1 разом з резистором R_1 утворюють ФВЧ. Частота зрізу ФВЧ:

$$f_{\text{зр}} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (3.4.1.9)$$

3.4.2 Розрахунок амплітудного детектора та інтегратора

В якості детектора (Рис.3.4.2.1) сигналу було обрано схема випрямляча з множенням напруги. Найпростішою з схем множення напруги є одно- напів-періодна схема подвоєння , що складається з елементів, що утворюють два одно-напівперіодних випрямлячі. Перший з випрямлячів

складається з діода VD1, конденсатора C1, а другий - з конденсатора C1, діода VD2, конденсатора C2 і навантаження R4. Протягом від'ємного напівперіоду, конденсатор C1 заряджається через діод VD1. Протягом наступного напівперіоду, конденсатор C1 розряджається таким чином, що напруга їх сумується. Під впливом цієї напруги конденсатор C2 заряджається через діод VD2. Конденсатор C2 заряджається тільки 1 раз за період, тому схема є однонапівперіодною.

Випрямлені детектором сигнали, ще не можуть бути використані як сигнали постійного струму, їх можна вважати сигналами постійного струму тільки в тому відношенні, що вони не змінюють свою полярність. В сигналі присутня велика кількість пульсацій напруги, які необхідно згладити для того, щоб отримати справжню напругу постійного струму. Для цього схему випрямляча потрібно доповнити фільтром низьких частот, який слугуватиме інтегратором. Конденсатор C2 слугує як накопичувач енергії, а не як елементи класичного фільтра низьких частот. Конденсатор підбирають так, щоб виконувалася умова $R_{15}C_{16} \geq \frac{1}{f}$ (де f - частота пульсацій, в даному випадку 41кГц). При цьому відбувається ослаблення пульсацій за рахунок того, що постійна часу для розрядки конденсатора істотно перевищує час між перезавантаженнями.

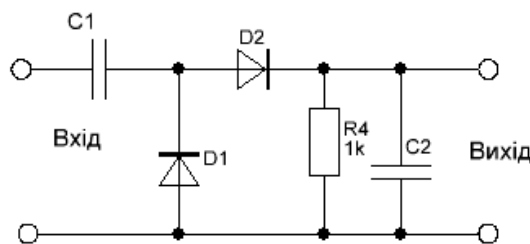


Рис.3.4.2.1 Схема детектора

3.4.3 Розробка цифрової частини схеми

Частина схеми, яка відповідає за прийняття рішення, щодо здвоєності купюр, побудована на мікроконтролері STM32F031F6P7TR. Мікроконтролер

є одним з кращих на ринку , завдяки технічним параметрам та собівартістю розробки програмного забезпечення.

Мікроконтролер STM32F031F6P7TR [10] характеризується такими параметрами:

- корпус TSSOP-20;
- максимальна тактова частота 48МГц;
- розмір програмної пам'яті 32Кб;
- розмір пам'яті ОЗП 4Кб;
- 16 входів / виходів;
- напруга живлення 2.4-3.3В;
- діапазон робочих температур -40—+150;
- 12 каналів АЦП з роздільною здатністю 12біт.

Мікроконтролери STM32F0 містять АЦП з роздільною здатністю 12 біт і швидкістю перетворення 1 мкс. Якщо є необхідність зменшити час перетворення, можна зменшити розрядність результату до 10, 8 або 6 біт. Кількість вхідних аналогових каналів - 16. Зручна система налаштувань АЦП дозволяє виконувати одноразові і циклічні перетворення, задаючи потрібні аналогові канали. Для контролю температури є вбудований температурний датчик, підключений до додаткового входу АЦП. Це робить STM32F0 незаперечним лідером в системах, де потрібно швидко і точно проводити збір даних з датчиків та виконувати обробку.

Сигнал отриманий з інтегратора , надходить на АЦП мікроконтролера .Після перетворення АЦП, приймається рішення , скільки купюр в каналі. Після перетворення АЦП , при не правильній топології друкованої плати , при розташуванні модуля біля силових ліній , або високочастотних, сигнальних провідників , на виміряний рівень напруги може накладатись завада, амплітуда якої змінюється періодично. В найгіршому випадку, кількість ефективних розрядів АЦП може зменшитись в 2 рази. Для утримання стабільного рівня напруги , рекомендовано в кінцевому варіанті

програмного забезпечення, реалізувати програмний експоненційний фільтр [11], який описується формулою :

$$Y_i = \alpha Y_{i-1} + (1 - \alpha) X_i \quad (3.4.1.10)$$

Де α - коефіцієнт фільтрації, Y_{i-1} - попереднє значення АЦП, X_i - виміряне значення АЦП.

Фактично , фільтр формує теперішнє значення сигналу сумою попереднього і теперішнього значення вимірювання, які вносяться частково, в залежності від коефіцієнта фільтрації . Даний фільтр застосовують для гасіння різких змін амплітуди сигналу. Фізично фільтр поводить себе як інтегратор, по відношенню до амплітуди сигналу. Мінуси фільтру – швидкість зміни значення залежить від частоти семплування АЦП.

Для даного модуля використовується внутрішній блок АЦП мікроконтролера. При використанні внутрішнього блоку – кількість ефективних розрядів зменшується до 9-10, через шуми периферійних блоків мікроконтролера. Це помітно при малих значеннях опорної напруги , відносно напруги живлення 3.3В. АЦП працює в однократному режимі перетворення. Час перетворення - 1.2мкс.

Рівень виміряний АЦП на проміжку в 240 вимірювань усереднюється , обробляється експоненціальним фільтром і далі аналізується. Якщо сигнал відповідає здвоєності купюр, мікроконтролер формує імпульс на одному з виходів, який є сигналом для керуючих блоків. Блок схема програми відповідає алгоритму роботи (Рис.3.4.3.1) .

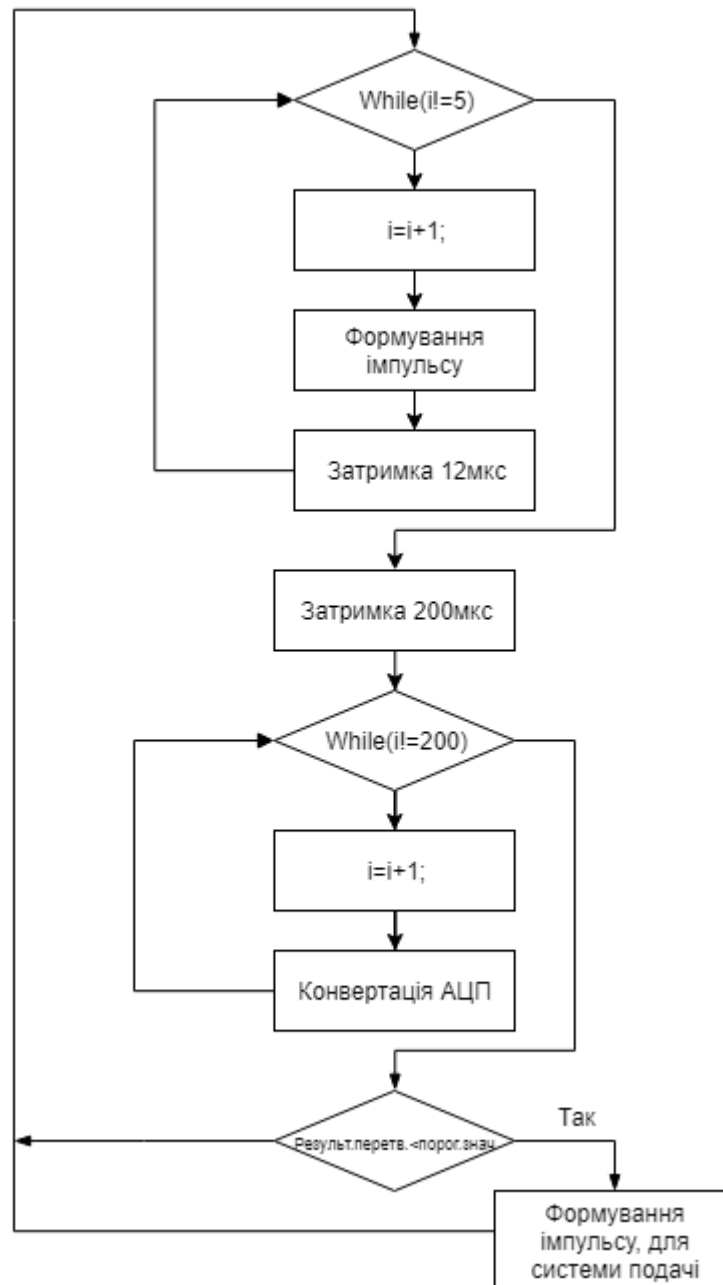


Рис.3.4.3.1 Блок схема алгоритму роботи програми

3.4.4 Блок живлення

Для безперебійної роботи пристрою потрібно стабільне, відфільтроване живлення (Рис. 3.4.4.1). Для аналогової частини – 12В, для цифрової – 3.3В. Для даного випадку було обрано два стабілізатори напруги, відповідних номіналів. Це дозволяє розширити діапазон напруги живлення «вверх», а саме –13-19В. Номінали фільтруючих конденсаторів $C_6, C_{10}, C_{11}, C_{15}$, які включаються в схему стабілізатора, обрано відповідно рекомендаціям в технічній документації на стабілізатори [5-6].

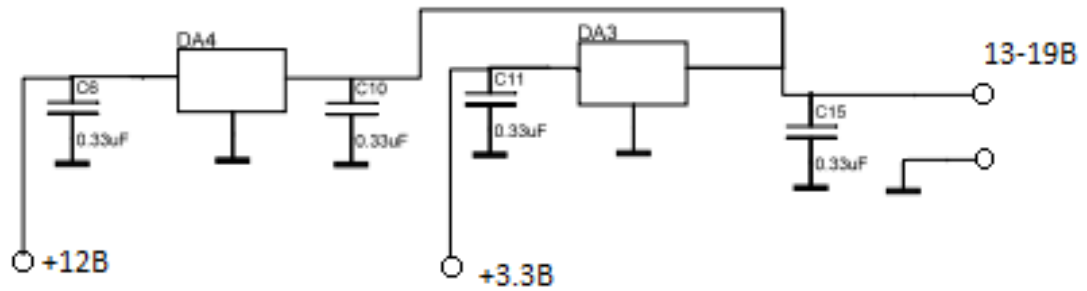


Рис. 3.4.4.1 Схема блоку живлення

3.5 Розробка друкованої плати

Для пристрою було розроблену друковану плату , та обрано електронні компоненти , їх розміри та марка.

Відповідно до ієрархічного принципу побудови електронної апаратури друкована плата пристрою буде розроблятися для 1-го рівня модульності – комірки. Буде розроблено нову конструкцію ДП. Згідно ГОСТ 16019-2001 апаратуру, яка використовує детектор здвоєності відносять до групи С2, яка є стаціонарною. Апаратура може експлуатуватись в не отоплюваних приміщення та на відкритому повітрі. Для апаратури даного класу характерно: підвищення та пониження температури, наявності піску і пилу, надлишкової вологості. Закінчений електронний модуль повинний мати якомога менші габарити та масу(так як він буде влаштовуватись в системи терміналів), забезпечувати доступність обслуговування , стійкість до вібрацій та ударів, інею та роси. Згідно ГОСТ 23752–79 (група жорсткості) повинна забезпечуватись робота приладу в широкому діапазоні робочих температур при високій відносній вологості повітря.

До необхідних технічних вимог можна віднести:

а) основні електричні характеристики:

–напруга живлення модулю ;

б) конструкційні та технологічні вимоги:

–забезпечити екранування землею сигнальних провідників та

провідників живлення;

–при трасуванні відділити сигнальні провідники від силових;

–земляні провідники трасувати за топологією «зірка»;

–забезпечити мінімальні габарити ДП;

–забезпечити доступність монтажу;

в) орієнтовні вимоги до надійності:

–напрацювання на відмову не менше 34000 годин;

г) орієнтовні вимоги до умов експлуатації: група виконання згідно ГОСТ 16019–2001 [3] С2, яка передбачає наявність вібрацій (діапазон частот 10–70 Гц, амплітуда прискорення 2g, тривалість дії 90 хв.), механічних ударів (пікове ударне прискорення 15g при тривалості дії 6 мс), соляного туману (тривалість дії 2 год), пилу і піску у відношенні 1:1 (тривалість дії 1 год при температурі), атмосферних опадів у вигляді дощу при інтенсивності випадіння, а також інею та роси при температурі.

Група жорсткості за ГОСТ 23752–79 – 2, що передбачає діапазон температур -40–+85, відносну вологість повітря 98 % при температурі 35 і атмосферний тиск 53600 Па;

д) орієнтовні габарити ДП: 110x55мм.

3.5 Аналіз зовнішніх впливів, , які можуть виникнути при експлуатації ДП:

а) вібрації –викликають зміщення елементів ДП , які сприяють появі деформацій , руйнування електронних компонентів , та руйнуванню провідників.

Способи боротьби:

– розташування резонансної частоти ДП подалі від частот зовнішніх вібрацій,

зміною технічних , вибором матеріалу основи ДП і способом її закріплення ;

– підвищення механічної міцності й жорсткості ДП шляхом покриття лаками ДП, використання конструкцій ДП, що передбачають таку зміну геометрії механічних з'єднань, яка б забезпечувала рівномірне розподілення механічних напружень по об'єму ДП;

б) удари – викликають руйнування ДП. Способи боротьби: використання ефективних способів закріплення друкованої плати;

в) висока температура – може викликати розширення, розм'якшення, знегажування, деформацію ДП (скручування, прогин) (способи боротьби – використання жаротривких матеріалів, вибір матеріалів ДП з близьким коефіцієнтом теплопровідності з матеріалом друкованих провідників), зменшення електропровідності та навантажувальної здатності друкованих провідників по струму, погіршення діелектричних властивостей (способи боротьби – збільшення ширини і товщини провідників, використання матеріалів з низькими діелектричними втратами), висихання і розтріскування захисних покриттів (способи боротьби – вибір покриттів, які є стійкими до підвищеної температури);

г) низька температура – може викликати зменшення електропровідності, погіршення діелектричних властивостей, а внаслідок конденсації вологи – деформацію, стиснення, крихкість, корозію друкованих провідників.

Способи боротьби:

– збільшення ширини й товщини провідників;

– вибір матеріалів, які є стійкими до пониженої температури;

г) висока відносна вологість – викликає адсорбцію та сорбцію парів води матеріалом ДП, що може призвести до струмів витоку по поверхні, зниженню поверхневого опору та опору ізоляції, набуханню матеріалу ДП,

корозію друкованих провідників.

Способи боротьби:

–вибір вологостійких і водостійких матеріалів ДП;
 –герметизація комірок;
 д) пісок та пил – порушують термічну стабільність , та можуть призвести до короткого замикання .

Способи боротьби:

–герметизація, покриття ДП епоксидними лаками;
 е) іній, роса та перепади температур – викликають виникнення конденсації вологи на поверхні ДП, що призводить до зменшення діелектричної міцності та опору ізоляції, корозію друкованих провідників,набухання матеріалу ДП і, як наслідок, її деформацію .

Способи боротьби:

–герметизація поверхні ДП разом із ЕРЕ за допомогою лаків, які необхідно наносити в умовах пониженої вологості повітря, або при можливості у вакуумних установках.
 є) сольовий туман – призводить до утворення корозії друкованих провідників.

Способи боротьби:

–герметизація ДП разом з ЕРЕ хімічно тривкими покриттями.

Отже, з урахуванням викладених вище технічних вимог, результатів аналізу впливу експлуатаційних чинників та на базі електричної схеми , було розроблено ДП(Рис 3.5.1).

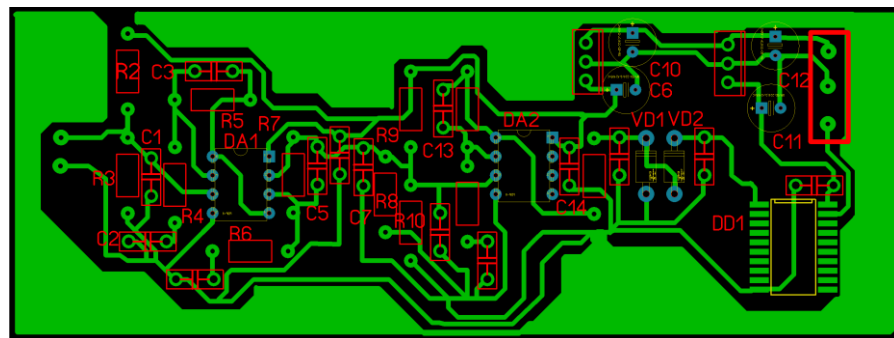


Рис 3.5.1 Друкована плата прийомного тракту

3.6 Лабораторне макетування

Після розрахунку схеми, було виготовлено лабораторний макет (Рис.3.6.1), для налаштування та перевірки правильності розрахунків.

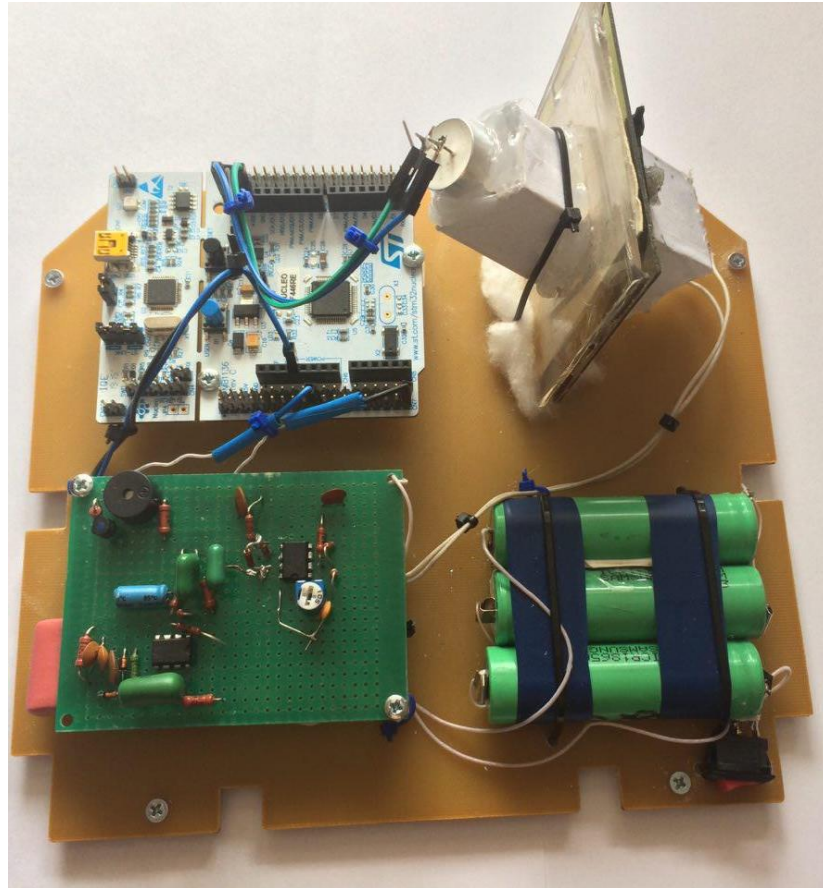


Рис.3.6.1 Лабораторний макет

В якості джерела живлення використано три акумуляторні батареї з напругою 3.7В, які з'єднано послідовно. Приймний тракт виконано на макетній платі, з урахування електро-магнітної сумісності. В якості цифрової частини, було взято плату для розробників Evaluation board STM32 з мікроконтролером STM32F446. Даний контролер відрізняється від того, що застосований при розробці друкованої плати, але АЦП в даному контролері ідентичний. За допомогою макету були отримані осцилограми сигналу на виході інтегратора (Рис.3.6.2–3.6.4). Три осцилограми відповідають ситуаціям, коли канал вільний, введено одну або дві купюри.

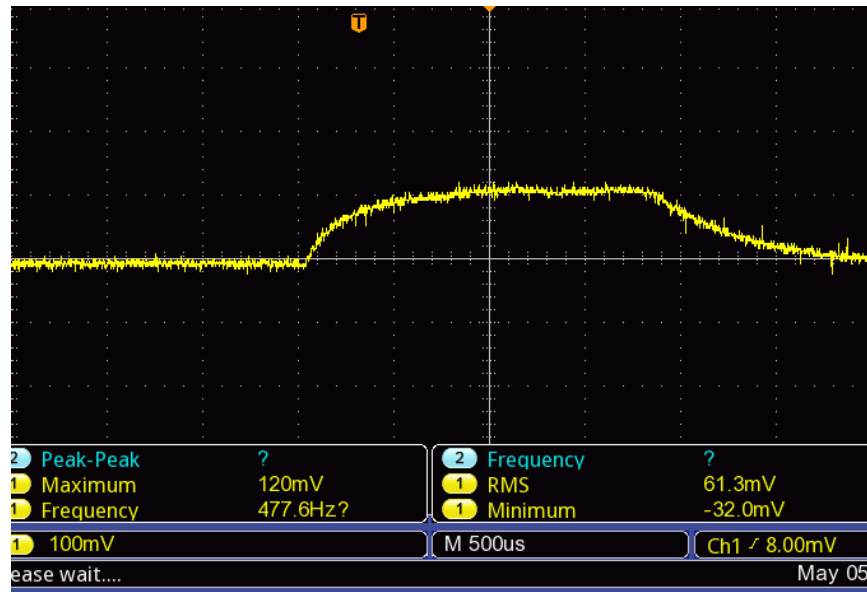


Рис.3.6.2 Осцилограма , знята з виходу інтегратора, при вільному каналі

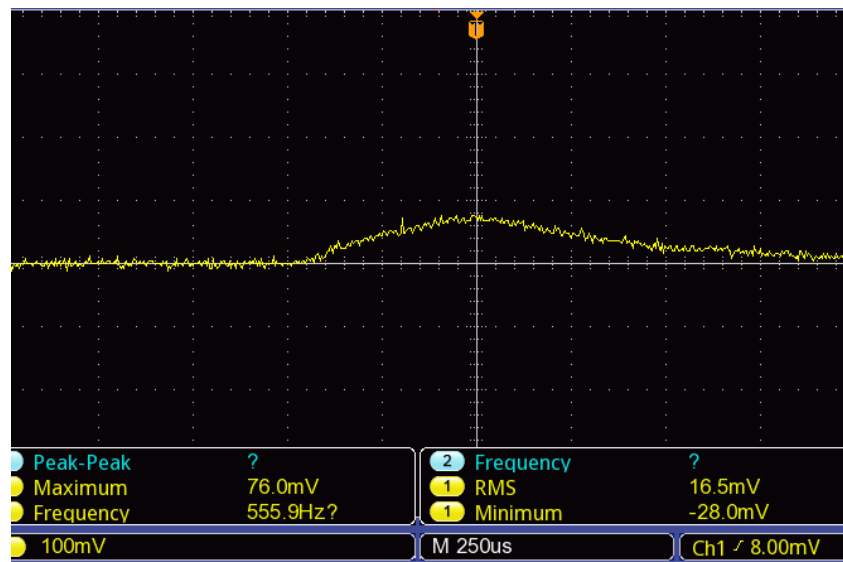


Рис. 3.6.3 Осцилограма , знята з виходу інтегратора, з однією купюрою в каналі

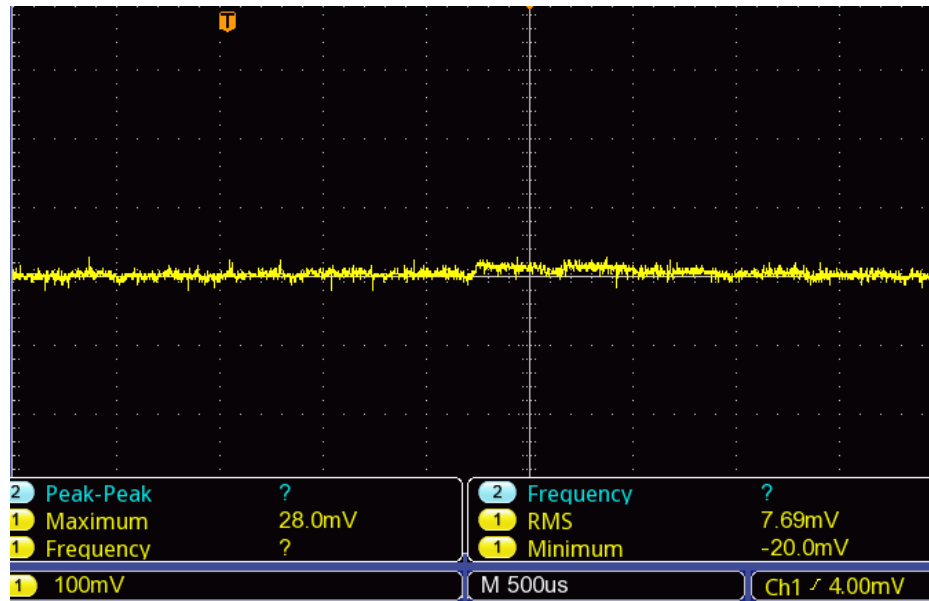


Рис. 3.6.4 Осцилограма , знята з виходу інтегратора, з двома купюрами в каналі

З осцилограм можна побачити , що рівень сигналу змінюється в залежності від кількості купюр . Обравши оптимальний час інтегрування вдалось згладити не рівномірність амплітуди сигналу, тим самим піднявши якість сигналу , та збільшити стабільність виявлення.. Також варто виділити те , яким чином відбувається збудження прийомного ЕАП . При надходженні випромінених 5-ти імпульсів, навіть якщо вони іншої частоти , імпульси збуджують коливання перетворювача на його власній частоті . Це відбувається через те , що перетворювач високо-добротний.

Також було виявлено ряд недоліків. При довго тривалому дослідженні було виявлено не стабільність амплітуди сигналу , при повторному введенні однієї купюри сигнал може змінюватись в широких межах. Дослідження показали , що в більшій мірі це відбувається через велику висоту каналу. При введенні купюри в канал , положення її є випадковим , і не завжди повторюється. Також детектування потрібно проводити при не рухомій купюрі , це пояснюється наявністю дифракції на щілині , в хвилеводі , а саме в момент , коли розмір не перекритого перерізу зрівнюється з довжиною хвилі. Через це виникає інтерференційна картина , яка змінюється в залежності від

руху купюри в каналі. З цього витікає не стабільність амплітуди при русі купюри і не можливість встановлення порогу для детектування здвоєності.

Для зменшення амплітуди перевідбиттів, прийомна частина хвилеводу, обклеєна звуко-поглинаючим матеріалом. Велику роль грає відстань на якій встановлюється прийомний перетворювач, при не вдалому розрахунку відстані можлива стояча хвиля, яка утворюється при відбитті від перетворювача до купюри.

При зміщенні в бік від центру введеної купюри проявляється нерівномірність амплітуди. При зміщенні, купюра повністю змінює характер перевідбиттів.

3.7 Висновок

Оскільки схемотехніка прийомного тракту базується на аналоговій та цифровій схемотехніці то справедливим є наступне.

1. Для тракту було використано операційні підсилювачі, що мають низький рівень нелінійних спотворень та шуму, та розподілено їх коефіцієнт підсилення, за допомогою трьох каскадах підсилення. Схемотехніка підсилювачів реалізована на базі неінвертуючого підсилювача. Обрано частотні межі підсилення. Дані рекомендації щодо стабілізації операційних підсилювачів, на етапі розробки схеми електричної.
2. Розроблено друковану плату та дані рекомендації щодо захисту плати від зовнішніх факторів.
3. Для цифрової частини тракту розроблено програмне забезпечення, використана цифрова фільтрація для забезпечення завадостійкості.
4. Зібрано лабораторний макет, за допомогою якого, було перевірено правильність розрахунку електронних компонентів, та досліджено рівень вихідної напруги з інтегратора в залежності від кількості купюр.

ВИСНОВКИ

В ході виконання роботи , виконано наступні завдання:

- Розроблено ультразвуковий сенсор , для контролю здвоєності грошових купюр.
- Проведено математичне дослідження принципу формування акустичного поля в трубі.
- Запропонована конструкція сенсора , для імплементації сенсора в транспортний канал купюри.
- Розроблено схему прийомного тракту сенсора, а також запропоновану конструкцію друкованої плати.
- Проведено лабораторне макетування сенсора , та досліджено його роботу.

Список використаної літератури

1. Р. Боббер. Гидроакустические измерения. – М. Мир, 1982 г.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Монография. Издание шестое. // Авторы: Пауль Хоровиц (Paul Horowitz), Уинфилд Хилл (Winfield Hill). Перевод с английского Б.Н. Бронина, А.И. Коротова, М.Н. Микшиса, Л.В. Поспелова, О.А. Соболевой, Ю.В. Чечеткина. Научное издание. (Москва: Издательство «Мир»: Редакция литературы по информатике и новой технике, 2003).
3. ГОСТ 16019–2001. Аппаратура сухопутной подвижной радиосвязи требования по стойкости к воздействию механических и климатических факторов и методы испытаний – Введ. 2002–01–01. – М. : Изд.-во стандартов, 2002. – IV, 12 с.
4. ГОСТ 23752–79. Платы печатные. Общие технические условия – Введ. 1980–01–07. – М. : Изд.-во стандартов, 1979. – 32 с.
5. Positive voltage regulator ICs 17803 [Electronic resource] URL : <https://www.st.com/resource/en/datasheet/178l.pdf> lm78l03
6. Positive voltage regulator ICs 17812 [Electronic resource] URL : <https://datasheet.ciiva.com/26904/17812abv-26904436.pdf>
7. NE5532x, SA5532x Dual Low-Noise Operational Amplifiers Texas Instruments [Electronic resource] URL : <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne5532a.pdf>
8. Особенности применения операционных усилителей при однополярном питании. Операционные усилители URL: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/intergal/352/doc/743/>
9. Поваренная книга разработчика аналоговых схем URL : <https://www.compel.ru/lib/articles/povarennaya-kniga-razrabotchika-analogovyih-shem-operatsionnyie-usiliteli-3>
10. ARM®-based 32-bit MCU with up to 32 Kbyte Flash, 9 timers, ADC and communication interfaces, 2.0 - 3.6 V [Electronic resource] URL : <https://ru.mouser.com/datasheet/2/389/stm32f031c4-956179.pdf>

- 11.В. А. Каладзе. Множественность форм экспоненциального фильтра // Международный институт компьютерных технологий –2009.
- 12.Double sheet sensors URL : http://www.longsunacoustic.com/html_products/Double-sheet-sensors-411.html
- 13.Пат. RU 2112279 Россия 27.05.1998. Машина для счета банковских билетов // Андреев А.В., Капралов М.И., Поротов В.А., Суев О.И., Яковлев В.А
14. Пат. RU 2434294 Россия 20.11.2011. Узел для контроля толщины листового материала и использующее его устройство// Минин П.В.
- 15.Ultrasonic sensors. [Electronic resource] URL: <https://www.microsonic.de>
16. ГОСТ 2.701-84 Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению – Введ. 01.07.85 . Изд.-во стандартов .
- 17.Ultrasonic sensor UM18 URL: <https://www.sick.com/be/en/distance-sensors/ultrasonic-sensors/um18/um18-51111/p/p222375>
- 18.Microsonic DBK+5 Series URL: <https://www.sensorpartners.com/en/ultrasonic-sensors/double-sheet/microsonic-dbk5-series/>
- 19.DBK+5. Ультразвуковой датчик контроля двойного листа . URL: <https://www.microsonic.de/ru/special-sensors/double-sheet-control/dbkplus5.htm>
- 20.Double sheet sensors URL: <https://blog.pepperl-fuchs.us/blog/bid/347553/Double-Sheet-Sensors-They-re-Not-Only-for-Paper>
- 21.Акустичні вимірювання. Конспект. Коржик О.В. – 2012.

Додаток А

```

#include "main.h"
#include "adc.h"
#include "gpio.h"

int n=0;
volatile uint16_t ADC_Result=0;
uint8_t State=1;
int count_ADC=0;
int ADC_sum;
int ADC_Last=0;
void SystemClock_Config(void);
int main(void)
{
    HAL_Init();
    SystemClock_Config();
    MX_GPIO_Init();
    MX_ADC3_Init();
    while (1)
    {
        switch(State){
            while(n<12){
                case 1:
                    ++ n;
                    HAL_GPIO_WritePin(GPIOB,GPIO_PIN_8,RESET);
                    for(int j=0;j<41;j++);
                    HAL_GPIO_WritePin(GPIOB,GPIO_PIN_8,SET);
                    for(int i=0;i<47;i++);
                }
                HAL_GPIO_WritePin(GPIOB,GPIO_PIN_8,RESET);
            }
            n=0 ;
        }
    }

```

```

State=2;
    break;
    case 2:
        for(int j=0;j<200;j++){
            State=3;
        }
        break;
    case 3:
        for(int i=0;i<30;i++){
            count_ADC++;
            HAL_ADC_Start(&hadc3);
            HAL_ADC_PollForConversion(&hadc3,100);
            ADC_sum += (uint32_t) HAL_ADC_GetValue(&hadc3);
            HAL_ADC_Stop(&hadc3);
        }
        ADC_Result=ADC_sum/count_ADC;
        count_ADC=0;
        ADC_Last=0.9*ADC_Last+0.1*ADC_Result;
        ADC_sum=0;
        State=4;
        break;
    case 4:
        if(ADC_Last<20){
            HAL_GPIO_WritePin(GPIOB,GPIO_PIN_9,SET);
        }
        if(ADC_Last>25){
            HAL_GPIO_WritePin(GPIOB,GPIO_PIN_9,RESET);
        }
        if(ADC_Last>100){
            HAL_GPIO_WritePin(GPIOA,GPIO_PIN_5,RESET);
        }

```

```

    }
    State=1;
    HAL_Delay(20);
        break;
    }
void SystemClock_Config(void)
{
    RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct = {0};
    RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct = {0};
    __HAL_RCC_PWR_CLK_ENABLE();

    __HAL_PWR_VOLTAGESCALING_CONFIG(PWR_REGULATOR_VOLTAGE_SCALE3);
    RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSI;
    RCC_OscInitStruct.HSIState = RCC_HSI_ON;
    RCC_OscInitStruct.HSICalibrationValue =
RCC_HSICALIBRATION_DEFAULT;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_NONE;
    if (HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
    /**Initializes the CPU, AHB and APB busses clocks
    */
    RCC_ClkInitStruct.ClockType =
RCC_CLOCKTYPE_HCLK|RCC_CLOCKTYPE_SYCLK
        |RCC_CLOCKTYPE_PCLK1|RCC_CLOCKTYPE_PCLK2;
    RCC_ClkInitStruct.SYSCLKSource = RCC_SYSCLKSOURCE_HSI;
    RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLK_DIV1;
    RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV1;

```

```
RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV1;
if (HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_0) !=
HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
}
void Error_Handler(void)
{
}

#ifdef USE_FULL_ASSERT
void assert_failed(uint8_t *file, uint32_t line)
{
}
#endif /* USE_FULL_ASSERT */
```